
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة الموصل
الخلايا الشمسية
مبادئ العمل، التقنية وتطبيقات المنظومة
تأليف مارتن أ. گرين
ترجمة الدكتور يوسف مولود حسن

الخلايا الشمسية

مبادئ العمل، التقنية، وتطبيقات المنظومة

نشر وطبع وتوزيع :
مديرية دار الكتب للطباعة والنشر
شارع ابن الاثير - الموصل
الجمهورية العراقية
هاتف ٧٦٣٢٣١
٧٦٣٢٣٥
تلكس ٨٠٩٢

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة الموصل

الخلايا الشمسية

مبادئ العمل، التقنية وتطبيقات المنظومة

تأليف

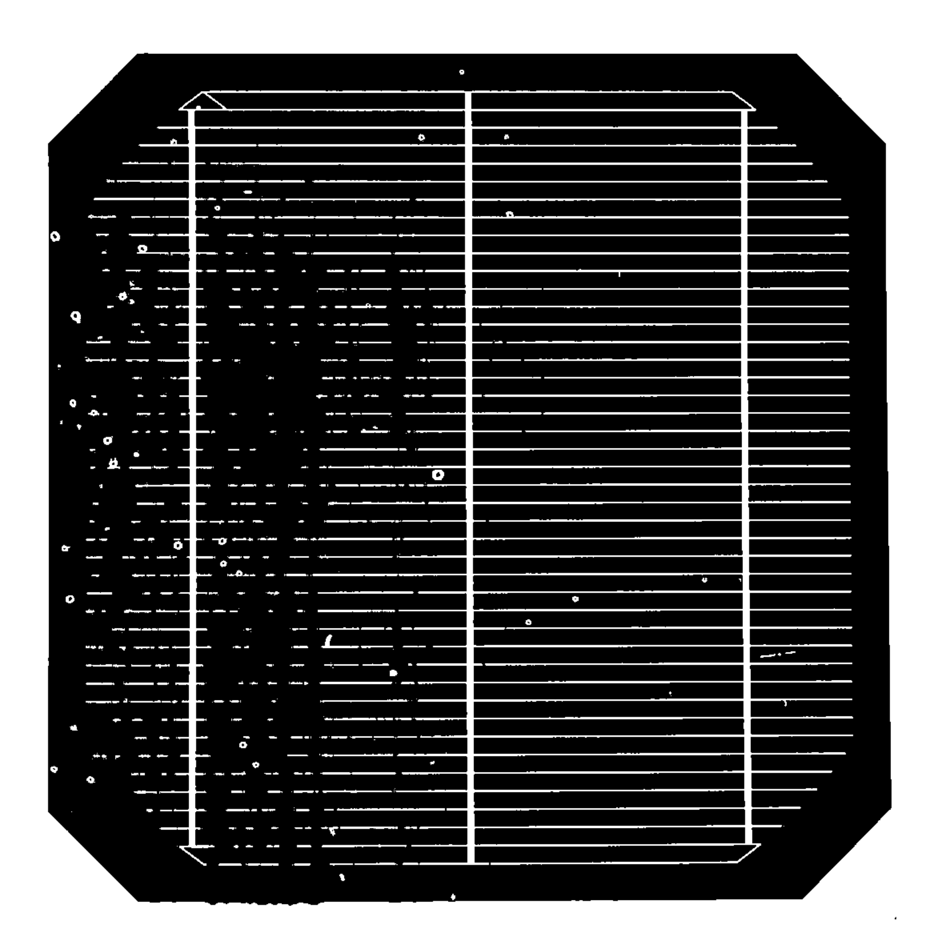
مارتن أ. كرين

ترجمة

الدكتور يوسف مولود حسن

استاذ مساعد قسم الفيزياء
كلية التربية/ جامعة الموصل

أتقدم بالشكر الجزيل الى كل من :
الدكتور فهر غالب الحياتي لتفضله بمراجعة الكتاب علمياً والسيد كريم سلمان الحمد لتفضله بمراجعة الكتاب لغوياً والسيد أسلام حسين لجهوده القيمة اثناء تحضير مسودة الكتاب .
والله الموفق



صنعت هذه الخلية من رقاقة سليكونية مربعة ضلعها 10 سم وسمكها اجزاء من الملمتر . عند اضاءتها تقوم الخلية بتحويل طاقة فوتونات الضوء الساقط الى طاقة كهربائية . وتحت ضوء الشمس ، تجهز هذه الخلية تياراً الى حد 3 امبير وحوالي $\frac{1}{2}$ فولت الى حمل كهربائي مربوط بين القطب الشبكي العلوي الظاهر في الشكل والقطب الخلفي للخلية (الصورة من Motorola Inc.) .

PERFACE المقدمة

عند سقوط الضوء على الخلية الشمسية فأن الطاقة الضوئية الساقطة تتحول مباشرة الى قدرة كهربائية دون حدوث حركة ميكانيكية لاي جزء من المنظومة أو تلوث البيئة بالمخلفات . تم استخدام الخلايا الشمسية ، بعيداً عن البحوث المختبرية لمدة عقدين من الزمن بعد اكتشافها ، لتجهيز السفن الفضائية بالقدرة الكهربائية وحديثاً بدأت استخدامها في المنظومات الارضية . وهناك محاولات كثيرة لتحسين تقنية صناعة هذه الخلايا وبكلفة قليلة بحيث تستطيع هذه الخلايا ان تسهم في سد احتياجات العالم من الطاقة .

يهتم هذا الكتاب بوصف مبادى عمل وتصميم الخلايا الشمسية وكذلك التقنيات المستخدمة لانتاج الخلية في الوقت الحاضر والتقنية المحسنة التي من المتوقع ان تدخل حيز العمل قريباً . ويهتم الكتاب ايضاً بالاعتبارات المهمة في تصميم منظومات الخلايا الشمسية لغرض الحصول على اكبر فائدة منها . وعليه فان الفصول الاولى من الكتاب تعرض خصائص ضوء الشمس والخصائص الاساسية لشبه الموصل ذات العلاقة بصناعة الخلاية الشمسية وثم الربط بين هذين العنصرين . اما المجموعة التالية من الفصول فتتناول بشيء من التفصيل العناصر المهمة في صناعة الخلايا الشمسية والتقنيات الحديثة لصناعتها والتطورات التقنية المحتملة في المستقبل القريب . أما الفصول الاخيرة فتبين بعض تطبيقات منظومات الخلايا الشمسية من المنظومات الصغيرة المتوفرة تجارياً في الوقت الحاضر ، وكلاً من المنظومات السكنية ومنظومة القدرة المركزية اللتين قد تتوفران في المستقبل القريب .

ان القصد من تأليف هذا الكتاب بصورة عامة هو تلبية حاجة المهندسين والعلماء المهتمين بهذا المجال السريع التقدم . كما انه يصلح للاستخدام ككتاب منهجي للدراسات الجامعية الاولية والدراسات العليا على حد سواء . لقد تعمدنا ادخال مواضيع في هذا الكتاب قد تساعد من يريد الدخول في هذا المجال من ابواب مختلفة . فمثلا هناك عرض وصفي لخصائص اشباه الموصلات ذات العلاقة بتركيب الخلايا الشمسية وعلى الرغم من ان هذا يخدم بعض القراء كعرض سريع للموضوع فأنه يشكل قاعدة مهمة للفصول اللاحقة بالنسبة للاخرين . بصرف النظر عن الخلفية الاساسية للموضوع فأن قراءة الكتاب وحل التمارين الموجودة في نهاية كل فصل تجعل القارىء غنياً بالمعلومات التي تساعد في البحث في هذا المجال .

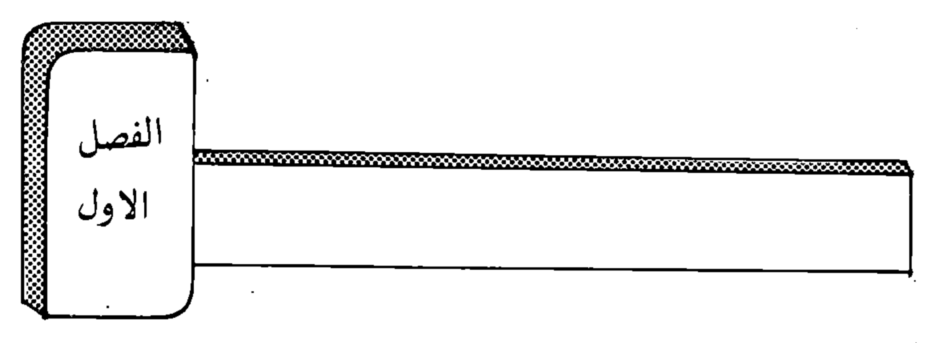
اود ان اشكر كثيرين ممن يتعذر حصرهم الذين حفزوا رغبتي في اتجاه موضوع الخلايا الشمسية خلال العقد الماضي وبالاخص كلا من Andy Blakers و Bruce Gadfrey و Phil Hazt وكذلك Mike Wilson لتوجيهاتهم وتشجيعهم غير المباشر في هذا المشروع وشكري الخاص لكل من Gelly Galang لمساعدتها في اعداد المسودة وكذلك John Todd و Mike Wilson لتهيئة الصور التي تضمنها هذا الكتاب . وأخيراً أود أن أشكر Juddy Green لمساعدتها وتشجيعها المستمر اثناء فترة عملي المركز لاعداد هذا الكتاب .

كرين . آ مارتن

المحتويات

الفصل الرابع

الفصل الخامس



ضوء الشمس والخلايا الشمسية

SOLAR CELLS AND SUNLIGHT

1 - 1 المقدمة INTRODUCTION

تقوم الخلايا الشمسية بتحويل ضوء الشمس مباشرة الى طاقة كهربائية مستفيدة من الخصائص الالكترونية لنوع معين من المواد تعرف بأشباه الموصلات (semiconductors) . نتطرق في الفصول القادمة الى هذه العملية البديعة لتحول الطاقة ، ابتداء من المفاهيم الأساسية لعمل الخلية الشمسية solar cell . وعلى هذه المفاهيم بنيت المعادلات التي تحدد عملية تحويل الطاقة ويتبعها وصف التقنيات المستخدمة في انتاج الخلايا الشمسية التجارية في الوقت الحاضر والمبينة في الغالب على شبه موصل محدد وهو السليكون (Silicon) . ثم يوصف التطور المستمر في هذه التقنية والتقنيات البديلة والتي تبشر بتقليل الكلفة . واخيرا تناقش تصاميم بعض منظومات الخلايا الشمسية ابتداء من مجهزات القدرة الصغيرة الصالحة للاستخدام في المناطق النائية الى المنظومات في المستقبل التي تصلح للتطبيقات السكنية ووحدات تولد القدرة المركزية .

اما في هذا الفصل فتعرض تاريخ تطور الخلايا الشمسية بأيجاز ثم تتبعها نظرة عامة على خصائص الشمس واشعتها .

1-2 خطوط عريضة عن تطور الخلية الشمسية
OUTLINE OF SOLAR cell DEVELOPMENT

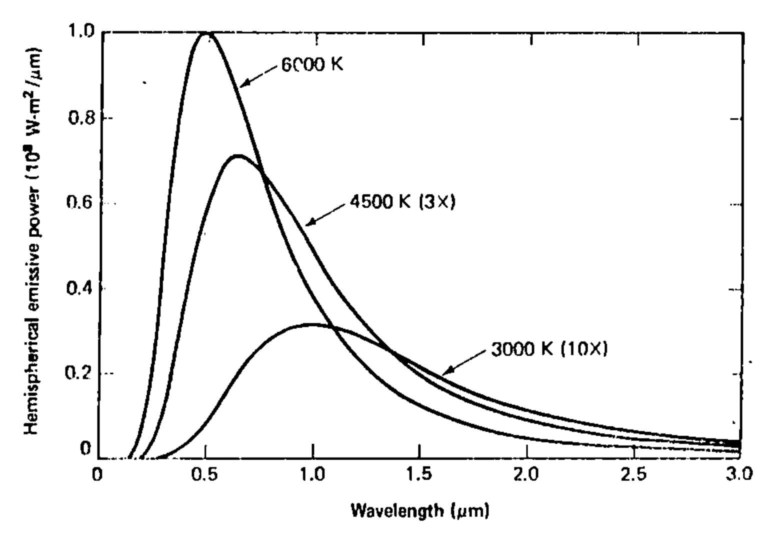
يعتمد عمل الخلايا الشمسية على الظاهرة الفوتوفولطائية (Photovoltaic effect) . لقد نشر عن هذه الظاهرة أول مرة في عام 1839 من قبل العالم بيكورل Becquerel الذي لاحظ ان الفولتية بين الاقطاب المغمورة في محلول الكتروليتي تعتمد على الضوء الساقط . وفي عام 1876 لوحظت هذه الظاهرة في جميع النبائط التي تشمل على مادة السلنيوم Se . وتبع ذلك ابتكار الخلايا الضوئية (Photocells) المصنوعة من هذه المادة واوكسيد النحاسوز (Cuprous Oxide) . على الرغم من أن أول ما نشر عن الخلية السليكونية كان سنة 1941 فلم يعرف عن الخلية السليكونية بشكلها الحالي الا في عام 1954 . واعتبرت هذه النبيطة (device) في حينه اعظم ابتكار لانها كانت اول تركيب فوتوفولطائي يقوم بتحويل الضوء الى طاقة كهربائية وبكفاءة مقبولة . وتم استخدام هذه الخلايا كمصادر قدرة في السفن الفضائية في عام 1958 وفي بداية الستينات اصبح استخدام الخلايا للاغراض الفضائية امراً مألوفاً ، وبقي هذا من أهم استخدامات الخلايا لعقد من الزمن . ويمكن الرجوع الى المرجع (1.1) للحصول على تفاصيل اكثر حول هذا الموضوع لهذه الحقبة من الزمن .

شهدت بداية السبعينات فترة ابداعية لتطوير الخلية السليكونية مع تزايد واضح في كفاءة تحويل الطاقة . وفي الوقت ذاته تقريباً كانت هناك صحوة اهتمام في استخدام هذه النبائط في التطبيقات الارضية . وفي نهاية السبعينات فاق حجم الخلايا المنتجة للاستخدامات الارضية تلك المنتجة للاستخدامات الفضائية ، ورافق هذه الزيادة في الانتاج انخفاض كبير في اسعار الخلية الشمسية لقد شهدت بداية الثمانينات انتاج تجريبي لتقنيات احدث تهدف الى خفض تكاليف الخلايا الشمسية للعقد القادم . وان هذا الانخفاض في الاسعار يشجع التوسع المستمر في التطبيقات التجارية في استغلال الطاقة الشمسية .

1.3 المصدر الطبيعي لضوء الشمس
PHYSICAL SOURCE OF SUN LIGHT

تعتبر الطاقة الاشعاعية للشمس المصدر الحيوي للحياة على كوكبنا فهي تحدد درجة حرارة سطح الارض ، اضافة الى تجهيز الطاقة لجميع العمليات الطبيعية على سطح الارض او في الغلاف الجوي المحيط بها .

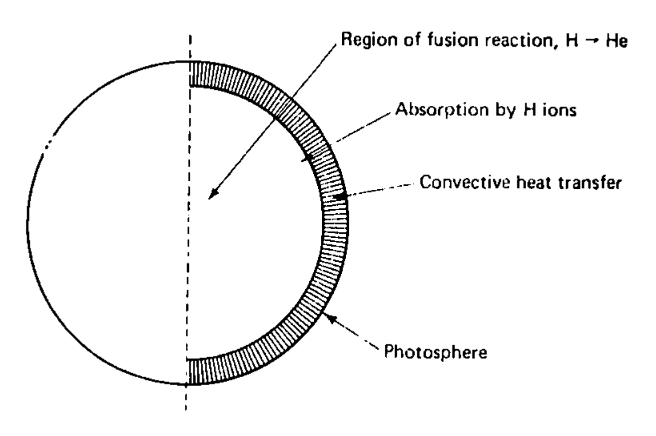
ان الشمس في الاساس عبارة عن كرة غازية متهيجة حرارياً بواسطة تفاعل الانـدمـاج النووي في مركزهـا . وينبعـث من الاجسام الساخنـة عـادة اشعـاع كهرومغناطيسي بتوزيع طيفي من الاطوال الموجية المختلفة تحدده درجة حرارة الجسـم . ويتبـع التـوزيع الطيـفـي للاشعاع المنبعـث مـن جسـم كامـل السـواد (black body) قانون بلانك للاشعاع (Plank's law radiation) (مرجع 1.2) وكما يبدو في الشكل 1.1 فان هذا القانون يبين انه عند تسخين الجسم تتزايد الطاقة الكلية للاشعاع الكهرومغناطيسي المنبعث ويتناقص الطول الموجي لذروة الطيف المنبعث . وكمثال توضيحي من حياتنا اليومية هو عند تسخين المعدن يتوهج اولا بلون احمر ثم يصبح أصفر عند زيادة تسخينه .



الشكل **1.1** توزيع طيفي لجسم اسود بلانكي عند درجات حرارية مختلفة .

تقدر درجة الحرارة قرب مركز الشمس بحوالي 20,000,000 درجة حرارة مطلقة . ومع ذلك فهذه ليست الحرارة التي تحدد صفات الاشعاع . الكهرومغناطيسي المنبعث من الشمس . ان معظم الاشعاع القوي المنبعث من مركز الشمس يمتص بواسطة طبقة من ايونات الهيدروجين السالبة قرب سطح الشمس حيث تقوم هذه الايونات بامتصاص متواصل لمدى كبير من الاطوال الموجيه فينشأ من تجمع الحرارة في هذه الطبقة تيارات الحمل الحرارية والتي تنقل الطاقه الفائضة خلال الحاجز البصري كما في (الشكل 1.2) وحال نفاذها خلال هذه الطبقة تعود الطاقة فتشع مرة ثانية خلال الغازات الشفافة نسبياً والواقعة فوق هذه الطبقة . ان المستوى الذي يهيمن

عنده الاشعاع على النقل بواسطة تيارات الحمل بعرف بالكرة الضوئية (Photosphere) ، وتكون درجة حرارة هذه الكرة الضوئية اقل بكثير من درجات الحرارة داخل الشمس ولكنها ايضا عالية نسبياً وتصل الى 6000 درجة مطلقة . تشع الكرة الضوئية طيف مستمر من الاشعاع الكهرومغناطيسي وهذا الطيف قريب جداً من طيف الاشعاع المنبعث من الجسم الكامل السواد عند الدرجة الحرارية نفسها .

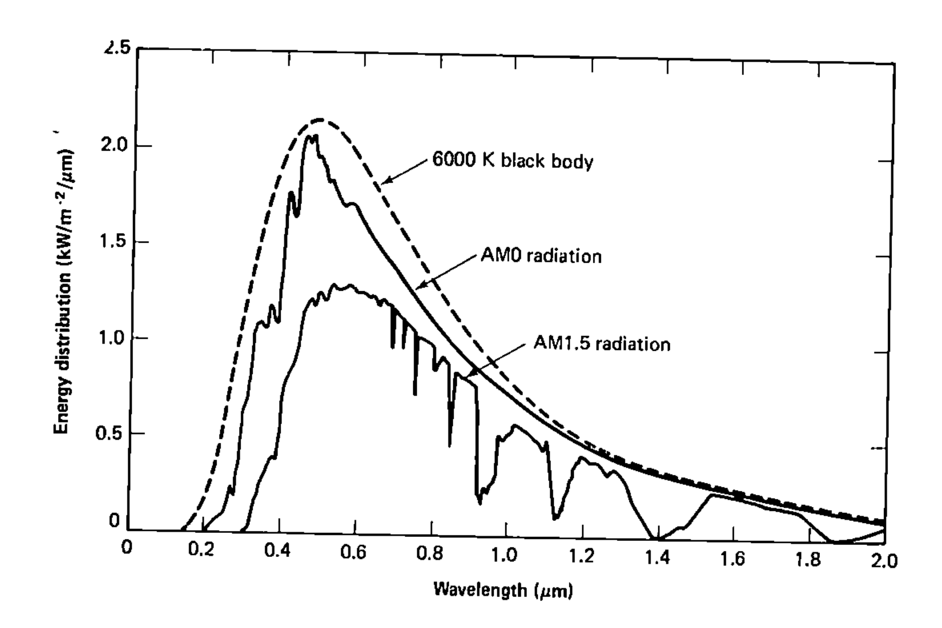


الشكل 1.2 الخصائص الاساسية للشمس

1.4 الثابت الشمسي THE SOLAR CONSTANT

ان القدرة الاشعاعية الساقطة على وحدة المساحة العمودية على اتجاه الاشعاع وعلى بعد متوسط المسافة بين الارض والشمس تعرف بالثابت الشمسي (solar constant) وتعرف ايضاً بأشعاع كتلة الهواء الصفري (AM0 radiation) لاسباب توضح فيا بعد .

ان القيمة المقبولة في الوقت الحاضر للثابت الشمسي المعمول بها في الفوتوفولطائية هي (1.353) كيلو واط / م^2. وتم الحصول على هذه القيمة من معدل القياسات المسجلة بأجهزة خاصة مثبتة على مناطيد وطائرات على ارتفاعات عالية وسفن الفضاء (مرجع 1.3) . يتبين من الشكل 1.3 ان منحنى التوزيع الطيفي لاشعاع AM 0 يختلف من منحنى اشعاع الجسم الاسود المثالي لاسباب منها : اختلاف نفاذية محيط الشمس للأطوال الموجية المختلفة . وقد تم حديثاً تدوين القيم المعمول بها في جداول خاصة في المرجع (1.3) إن معرفة التوزيع الدقيق لمكونات



الشكل **1.3** التوزيع الطيفي لضوء الشمس . مبيناً الحالات الاشعاعية **AM0** و **AM1.5** والتوزيع الطيفي المتوقع من الشمس اذ اعتبرت كجسم اسود درجة حرارته **6000** درجة مطلقة .

الطاقة في ضوء الشمس ضرورية لمعرفة عمل الخلية الشمسية لأن استجابة هذه الخلايا تختلف باختلاف الاطوال الموجية للحزمة الضوئية .

1-5 شدة إشعاع الشمس على سطح الأرض

SOLAR INTENSITY AT THE EARTH'S SURFACE

تقل شدة ضوء الشمس على الاقل بمقدار 30% خلال مروره بالغلاف الجوي واسباب هذا التوهين (مرجع 1.4) هي :

١ ـ تشتت رايلي (Rayleign scattering) او التشتت بسبب الجزيئات الموجوودة في الجو . توهن ضوء الشمس عند جميع الاطوال الموجية ولكنها تكون اكثر فعالية عند الاطوال الموجية القصيرة .

٢ ـ التشتت بسبب الرذاذ (aerosols) وجسيمات التراب .

٣ ـ الامتصاص من قبل المكونات الغازية للغلاف الجوي التي منها الاوكسجين والاوزون وبخار الماء وثاني اوكسيد الكاربون وغيرها .

نموذج التوزيع الطيفي لضوء الشمس على سطح الأرض مبين بالمنحني الأسفل من الشكل 1.3 والذي يبين حزم الامتصاص ذات العلاقة بالامتصاص الجزيئي .

ان درجة التوهين متغيرة جداً . واهم عامل يحدد القدرة الكلية الساقطة عند ظروف صافية هو طول مسار الضوء خلال الغلاف الجوي ويصبح هذا أقصر ما يمكن عندما تكون الشمس فوق الرأس مباشرة والنسبة بين طول أي مسار حقيقي واقصر مسار تعرف بكتلة الهواء البصري (optical air mass) عندما تكون الشمس مباشرة فوق الراس يعرف الاشعاع باشعاع كتلة هواء الواحدة (AM1) وعندما تصبح الشمس بزاوية θ مع عمود فوق الرأس فأن كتلة الهواء تحدد وفق العلاقة

$$\text{Air mass} = \frac{1}{\cos\theta} \qquad (1.1)$$

فعندما θ تساوي 60 درجة فأن الاشعاع هو AM2 وأبسط طريقة لتقدير كتلة الهواء تكون عن طريق قياس الظل (s) المتكون لجسم عمودي ذي ارتفاع (h) فأن :

$$\text{Air mass} = \sqrt{1 + \left(\frac{s}{h}\right)^2} \qquad (1.2)$$

مع تزايد كتلة الهواء وثبوت المتغيرات الجوية الاخرى تتوهن الطاقة التي تصل الى الأرض لكافة الاطوال الموجية مع زيادة ملحوظة في حزم الامتصاص الموضح في الشكل 3.1 .

لذا فان ضوء الشمس الواصل الى الارض يتغير تغيراً كبيراً من حيث الشدة والتركيب الطيفي على عكس ماهو عليه خارج الغلاف الجوي . ولغرض اجراء مقارنة معقولة بين اداء خلايا شمسية مختلفة عند اختبارها في مواقع مختلفة على الارض ، يجب أن يكون هناك مقياس أرضي (terrestrail standard) معين بحيث تنسب اليه جميع القياسات الاخرى . فإن أحسن مقياس وأوسعها إستخداماً الى وقت اعداد هذا الكتاب هو توزيع اشعاع AM1.5 الموضح في الجدول 1.1 والمبين على شكل منحنى في الشكل 3.1 . وقد تم إعتبار هذا التوزيع للأشعاع كمقياس على السطح الارض في البرنامج الامريكي الخاص بدراسة الفوتوفولطائيه في سنة 1977 (مرجع 1.5) وقد تم تغيير هذا المقياس على أن يكون معدل كثافة القدرة الكلية المتضمنة هي 1 كيلو واط/ م٢ وكثافة هذه القدرة تعتبر أعلى قدرة شمسية ساقطة على سطح الأرض تقريباً .

1-6 الاشعاع المباشر والمنتشر

DIRECT AND DIFFUSE RADIATION

ان التركيب الطيفي لضوء الشمس كثير التعقيد لأن بالاضافة الى مركبة الاشعاع المباشر للشمس ، فأن التشتت الجوي للضوء يؤدي الى تكوين مركبة الاشعاع المنتشر أو غير المباشر . حتى عندما تكون السماء صافية وخالية من الغيوم فان قيمة مركبة الاشعاع المنتشر(diffused component)تقدر بحوالي 10-20% من الاشعاع الكلي المستلم على السطح الافقي خلال النهار .

أما في الأيام الغائمة فأن نسبة الاشعاع المنتشر تتزايد بصورة عامة . ومن المعلومات المسجلة (مرجع 1.6) يمكن ملاحظة الحالة الأحصائية التالية : في الأيام التي تفتقر الى الشمس المشرقة فأن معظم الأشعاع يكون منتشراً وهذا يكون صحيحاً للأيام التي تكون نسبة الاشعاع الكلي فيها هي ثلث الاشعاع المستلم في يوم صافي ومشمس لليوم نفسه من السنة . اما في الايام التي تكون بين الايام المشمسة والغائمة أي عندما يكون الاشعاع المستلم حوال نصف إشعاع اليوم الصافي ، فأن حوالي 50% من هذا الاشعاع يكون من النوع المنتشر . ان الطقس الرديء في بعض مناطق العالم لايسبب استلام كميات قليلة من الاشعاع الشمسي فحسب بل يؤدي الى زيادة المركبة المنتشرة منها .

ان التركيب الطيفي للضوء المنتشر يختلف تماماً عن الضوء المباشر . وبصورة عامة فالضوء المنتشر يكون اغنى بالأطوال الموجبة القصيرة أو الضوء الأزرق وهذا يسبب تغييراً كبيراً في التركيب الطيفي للضوء الساقط على الخلية الشمسية . وعليه فأن التوزيع غير المنتظ للضوء المنتشر في الغلاف الجوي يسبب عدم الدقة في ايجاد قيم الاشعاع على السطوح المائلة من البيانات المسجلة على السطوح الافقية . على الرغم من ان الجو المحيط بالشمس يعتبر اكبر مصدر للاشعاع المنتشر ويفترض عادة ان يكون هذا الاشعاع منتظماً في جميع الاتجاهات (Isotropic) .

تستقبل المنظومة الفوتوفولطائية التي تعمل على ضوء الشمس المركز (concentrated sun light) بصورة عامة ، حزمة ضوئية كمدى محدود من الزوايا . ولذا يجب ان تتبابع هذه المنظومات مسار الشمس وذلك للاستفادة من مركبة الاشعاع المباشر لضوء الشمس وتبديد المركبة المنتشرة . وهذا يؤدي الى تقليل من فائدة مثل هذه المنظومة وذلك لعدم استقبال اقصى كثافة للقدرة الشمسية لبقائها عمودية دائماً على اشعة الشمس .

جدول 1-1 طيف شمسي ـ كتلة هواء 1.5* (AM1.5)

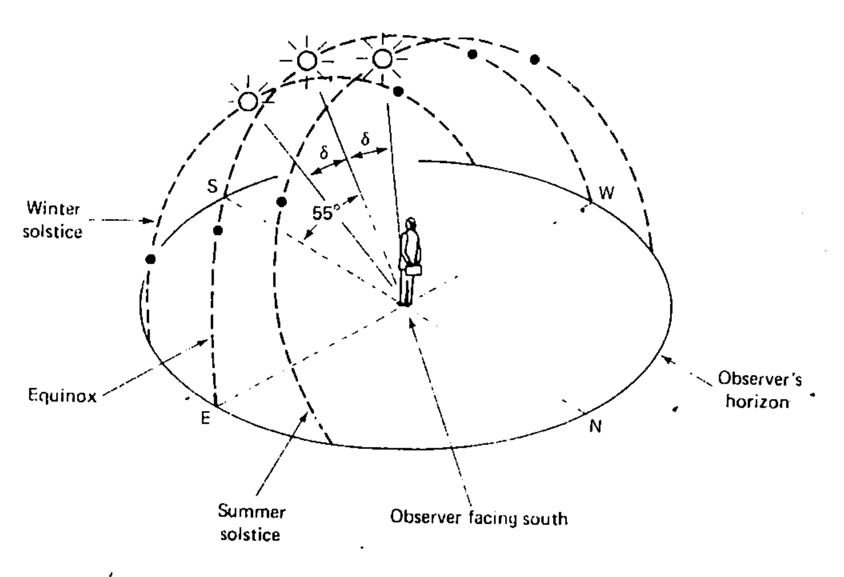
Wave-length (μm)	$W/(m^2 - \mu m)$	*Wave-length* (μm)	$W/(m^2 - \mu m)$	*Wave-length* (μm)	$W/(m^2 - \mu m)$	*Wave-length* (μm)	$W/(m^2 - \mu m)$	*Wave-length* (μm)	$W/(m^2 - \mu m)$
0.295	0	0.595	1262.61	0.870	843.02	1.276	344.11	2.388	31.93
0.305	1.32	0.605	1261.79	0.875	835.10	1.288	345.69	2.415	28.10
0.315	20.96	0.615	1255.43	0.8875	817.12	1.314	284.24	2.453	24.96
0.325	113.48	0.625	1240.19	0.900	807.83	1.335	175.28	2.494	15.82
0.335	182.23	0.635	1243.79	0.9075	793.87	1.384	2.42	2.537	2.59
0.345	234.43	0.645	1233.96	0.915	778.97	1.432	30.06		
0.355	286.01	0.655	1188.32	0.925	217.12	1.457	67.14		
0.365	355.88	0.665	1228.40	0.930	163.72	1.472	59.89		
0.375	386.80	0.675	1210.08	0.940	249.12	1.542	240.85		
0.385	381.78	0.685	1200.72	0.950	231.30	1.572	226.14		
0.395	492.18	0.695	1181.24	0.955	255.61	1.599	220.46		
0.405	751.72	0.6983	973.53	0.965	279.69	1.608	211.76		
0.415	822.45	0.700	1173.31	0.975	529.64	1.626	211.26		
0.425	842.26	0.710	1152.70	0.985	496.64	1.644	201.85		
0.435	890.55	0.720	1133.83	1.018	585.03	1.650	199.68		
0.445	1077.07	0.7277	974.30	1.082	486.20	1.676	180.50		
0.455	1162.43	0.730	1110.93	1.094	448.74	1.732	161.59		
0.465	1180.61	0.740	1086.44	1.098	486.72	1.782	136.65		
0.475	1212.72	0.750	1070.44	1.101	500.57	1.862	2.01		
0.485	1180.43	0.7621	733.08	1.128	100.86	1.955	39.43		
0.495	1253.83	0.770	1036.01	1.131	116.87	2.008	72.58		
0.505	1242.28	0.780	1018.42	1.137	108.68	2.014	80.01		
0.515	1211.01	0.790	1003.58	1.144	155.44	2.057	72.57		
0.525	1244.87	0.800	988.11	1.147	139.19	2.124	70.29		
0.535	1299.51	0.8059	860.28	1.178	374.29	2.156	64.76		
0.545	1273.47	0.825	932.74	1.189	383.37	2.201	68.29		
0.555	1276.14	0.830	923.87	1.193	424.85	2.266	62.52		
0.565	1277.74	0.835	914.95	1.222	382.57	2.320	57.03		
0.575	1292.51	0.8465	407.11	1.236	383.81	2.338	53.57		
0.585	1284.55	0.860	857.46	1.264	323.88	2.356	50.01		

* محتويات الطاقة الكلية = 832 واط/ م² (من مرجع 1.5)

APPARENT MOTION OF THE SUN الحركة الظاهرية للشمس 1-7

تدور الارض يومياً حول محور خيالي والذي يكون اتجاهه ثابتاً بالنسبة الى مستوي المدار السنوي للأرض حول الشمس . وان الزاوية بين هذا الاتجاه ومستوي المدار وهي الميل الشمسي (olar declination) ($23^\circ 27^-$) . وتكون تفاصيل الحركة الظاهرية للشمس الناتجة من العلاقة الموصوفة اعلاه غير مألوفة بالنسبة لناظر ثابت على سطح الارض .

ويبين الشكل 4.1 الحركة الظاهرية بالنسبة لناظر على سطح الارض وعند خط عرض 35 درجة شمالاً . في اي يوم من ايام السنة ، يقع مستوى مدار الشمس الظاهري عند زاوية من عمود لمشاهد يكون مساوية لخط العرض . وان الشمس ، عند الاعتدالين الربيعي والخريفي (eqainoxes) ، (21 و 23 ايلول) تشرق من الشرق وتغيب في الغرب فتكون زاوية الارتفاع الشمسي (altitude) عند الظهيرة في هذين اليومين تساوي 90 مطروحاً منه زاوية خط العرض . اما عند الانقلابين الصيفي والشتوي (21 حزيران و 22 كانون الأول على التوالي في (solsices) النصف الشمالي من الكرة الارضية والعكس صحيح بالنسبة للنصف الجنوبي) فأن



الشكل 1.4 يبين الحركة الظاهرية للشمس نسبة الى ناظر مستقر عند خط العرض 35 في النصف الشمالي من الكرة الأرضية ومسار الشمس عند كل من الاعتدالين والانقلاب الصيفي والشتوي . وموقع الشمس موضح عند الظهيرة لهذه الايام . والدوائر المظللة تمثل موقع الشمس لثلاث ساعات قبل وبعد الظهيرة .

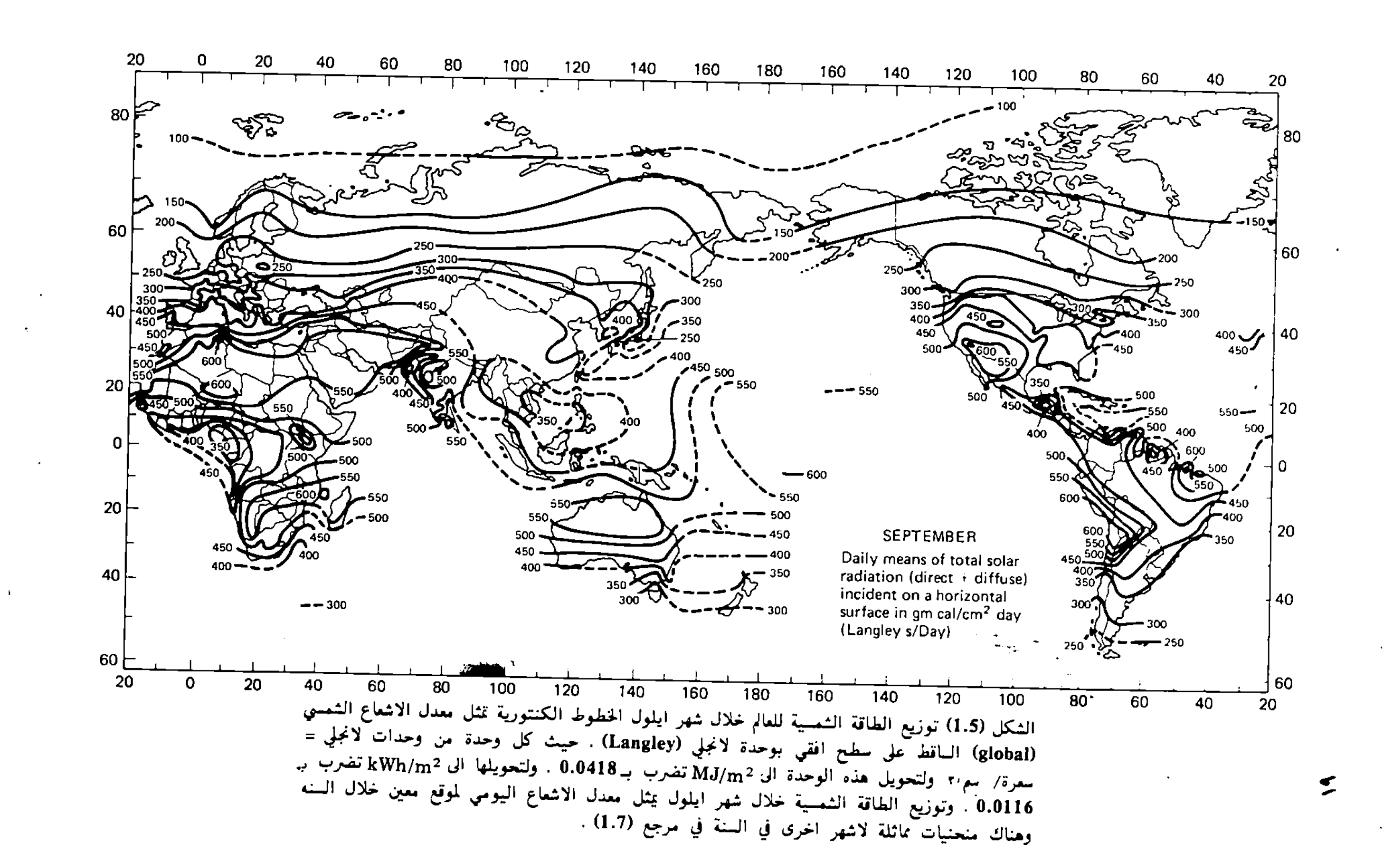
زاوية الارتفاع الشمسي عند الظهيرة تساوي زاوية الارتفاع في الاعتدالين مع اضافة أو طرح زاوية الميلان ($23^{\circ}27^{-}$).

1-8 بيانات الاشعاع الشمسي SOLAR INSOLATION DATA

ان الموقع المثالي لبناء منظومات فوتوفولطائية يكون عند توفر بيانات مفصلة حول الاشعاع الشمسي عند هذا الموقع ، اضافة الى البيانات الخاصة بالاشعاع الشمسي المباشر والمنتشر ينبغي الاستفادة ايضاً من البيانات الخاصة ، بدرجات حرارة المحيط وسرعة اتجاه الريح . ومع وجود محطات في اماكن مختلفة من العالم تقوم بتسجيل هذه المتغيرات الا ان استخدام منظومات الفوتوفولطائية ، لاسباب اقتصادية ، ينحصر في المناطق النائية التي تقتصر الى مثل هذه البيانات .

إن الاشعاع الشمسي ، في مكان معين لايعتمد على المعالم الجغرافية الرئيسة لهذا المكان كخطوط الطول والعرض والارتفاع عن سطح البحر والتصنيف المناخي ، والنباتات الطبيعية فحسب بل يعتمد اعتماداً كبيراً على المعالم الجغرافية الموضعية ايضاً . على الرغم من انه لايمكن تجميع هذه المعلومات كاملة الا ان خرائط توزيع الاشعاعات الشمسية متوفرة لأماكن مختلفة من العالم. حيث يتم تحضير هذه الخرائط عادة من جمع بيانات القياسات الشمسية مع المعلومات المسجلة من قبل شبكات المحطات الكبيرة المترابطة حول العالم والتي تقوم بمراقبة ساعات شروق الشمس .

ان المعلومات المتوفرة بصورة عامة هي معدل الاشعاع الشمسي الكلي (global radiation) على السطح الافقي . والمرجع المناسب للحصول على مثل هذه المعلومات هو مرجع 1.7 حيث سجل فيه معدل الاشعاع اليومي لكل شهر من السنة على السطح الافقي للمئات من محطات مراقبة الاشعاع الشمسي حول العالم وكذلك سجلت المعلومات المحتملة من تسجيلات سطوح الشمس لكل ساعة من ساعات النهار مع اخذ المعلومات المناخية والنباتات الطبيعية ، بعين الاعتبار لعدة مئات من المواقع الاخرى . ولقد تم جمع هذه المعلومات في خرائط عالمية توضح فيها الخطوط الكنتورية للاشعاعات الشمسية لكل شهر من اشهر السنة . ومثل هذه الخطوط الكنتورية مبينة في الشكل 1.5 لشهر الاعتدال الخريفي (ايلول) . حيث يمثل هذا الشهر تقريباً معدل مستويات الاشعاع الشمسي خلال السنة لمعظم الاماكن .



الشكل (1.5) توزيع الطاقة الشمسية للعالم خلال شهر ايلول الخطوط الكنتورية تمثل معدل الاشعاع الشمسي (global) الساقط على سطح افقي بوحدة لانجلي (Langley) . حيث كل وحدة من وحدات لانجلي = سعرة/ سم٢، ولتحويل هذه الوحدة الى MJ/m^2 تضرب بـ 0.0418 . ولتحويلها الى kWh/m^2 تضرب بـ 0.0116 . وتوزيع الطاقة الشمسية خلال شهر ايلول يمثل معدل الاشعاع اليومي لموقع معين خلال السنه وهناك منحنيات مماثلة لاشهر اخرى في السنة في مرجع (1.7) .

1-9 الخلاصة SUMMARY

على الرغم من ان ضوء الشمس خارج الغلاف الجوي ثابت نسبياً فان الحالة على سطح الارض اكثر تعقيداً ان ضوء الشمس الساقط على الازض متغير ولا يمكن التنبؤ بكميته وشدته وتركيبه الطيفي . وفي الايام الصافية يعتبر طول مسار ضوء الشمس خلال الغلاف الجوي أو كتلة الهواء البصري عنصر مهماً . كما تكون مركبة الاشعاع غير المباشر أو المنتشر مهمة خاصة عند الظروف غير المثالية . والتقديرات المقبولة للاشعاع الكلي (المباشر + المنتشر) المستلم سنوياً على السطح الافقي اصبحت متيسرة في اغلب مناطق العالم ومع ذلك فهناك شكوك عند استخدامها في اماكن اخرى وذلك بسبب الاختلافات الكبيرة الناتجة من المعالم الجغرافية الموضعية والحسابات التقريبية لتحويل الاشعاع الساقط على السطح الافقي الى السطح المائل .

تمارين

1-1- اوجد الثابت الشمسي لكل من عطارد والمريخ ، اذا علمت ان معدل البعد بين الشمس وكل من الارض وعطارد والمريخ هو 150 و 58 و 228 مليون كم على التوالي .

1-2- اذا كانت الشمس عند ارتفاع 30 درجة عن الافق اوجد كتلة الهواء المناظرة لهذا الارتفاع .

1-3- احسب ارتفاع الشمس عند الظهيرة في 21 حزيران لكل من سدني (خط عرض 34 جنوباً) وسان فرانسيسكو (خط عرض °38 شمالاً) ونيودلهي (خط عرض °29 شمالاً) .

1-4- اذا كان الاشعاع الكلي عند الظهيرة في الانقلاب الصيفي لمدينة البكيركي نيومكسيكو (خط عرض °35 شمالاً) هو 60 ملي واط/ سم^2 . افرض ان 30% من هذا الاشعاع هو من نوع المنتشر وان الارض المحيطة بالجهاز غير عاكسة وكان الاشعاع المنتشر منتظماً في الجو . أوجد شدة الاشعاع على سطح مستو باتجاه الجنوب بزاوية °45 عن الافق .

REFERENCES المراجع

[1.1] M. WOLF, "Historical Development of Solar Cells," in *Solar Cells*, ed. C. E. Backus (New York: IEEE Press, 1976).

[1.2] R. SIEGEL AND J. R. HOWELL, *Thermal Radiation Heat Transfer* (New York: McGraw-Hill, 1972).

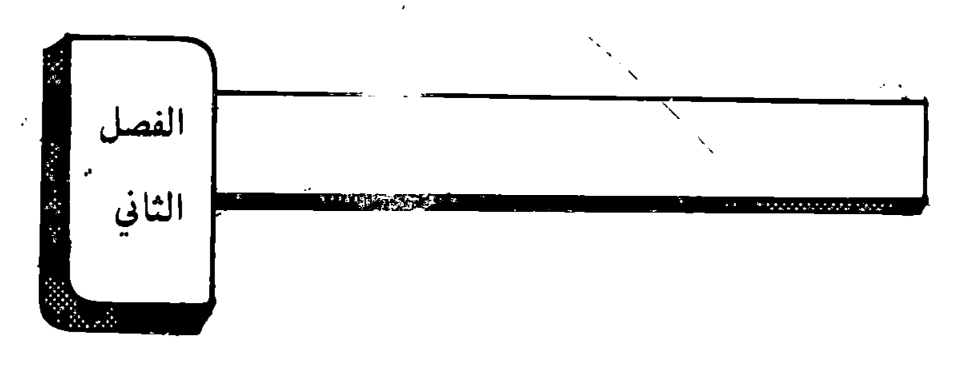
[1.3] M. P. THEKACKARA, *The Solar Constant and the Solar Spectrum Measured from a Research Aircraft*, NASA Technical Report No. R-351, 1970.

[1.4] P. R. GAST, "Solar Radiation," in *Handbook of Geophysics*, ed. C. F. Campen et al. (New York: Macmillan, 1960), pp. 14-16 to 16-30.

[1.5] *Terrestrial Photovoltaic Measurement Procedures*, Report ERDA/NASA/1022-77/16, June 1977.

[1.6] B. Y. LIU AND R. C. JORDAN, "The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation," *Solar Energy 4* (July 1960), 1-19.

[1.7] G. O. G. LÖF, J. A. DUFFIE, AND C. O. SMITH, *World Distribution of Solar Energy*, Report No. 21, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, July 1966.



نظرة استعراضية لخصائص شبه الموصل

REVIEW OF SEMICONDUCTOR PROPERTIES

2.1 المقدمة INTRODUCTION

لقد تم في الفصل الاول عرض خواص ضوء الشمس اما الان فنوجز خصائص عنصر اخر ومهم في تحويل الطاقة الشمسية الى طاقة كهربائية وهي المادة الشبه الموصلة

في هذا الفصل نحاول دراسة خصائص اشباه الموصلات المهمة في عمل وتصميم الخلايا الشمسية (solar cells) وغير مهمة من حيث المفاهيم الاساسية الخاصة بهذه المادة . وقد يعتبر هذا الفصل مراجعة سريعة لاصحاب الاختصاص بهذه المادة كما يحتوي على معلومات وافية لغير المختصين بهذا الموضوع حتى يترسخ لديهم اساس لفهم المواضيع اللاحقة . ولاجل تقوية هذا الاساس يراجع القراء غير الملمين بالموضوع احد المراجع الكثيرة الخاصة بدراسة الخصائص الاساسية لشبه الموصل (مرجع 2.1 و 2.4) .

2-2 البنية البلورية والاتجاهات

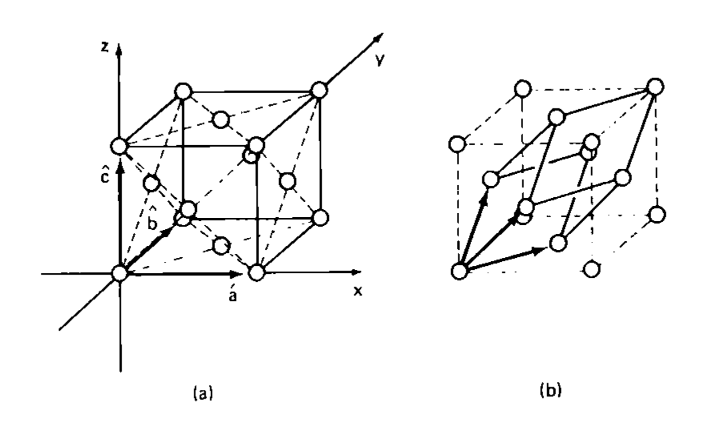
CRYSTAL STRUCTURE and ORIENTATIONS

ان اغلب المواد الفوتوفولطائية التي توصف في هذا الكتاب هي بلورية crystalline على الاقل على مقياس مجهري (Microscopic) والمادة البلورية المثالية تتميز بالتنظيم الدوري (Periodic) للذرات المكونة لها .

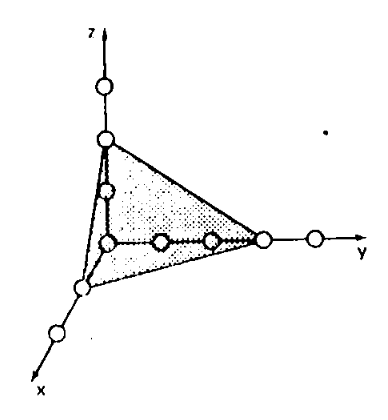
في مثل هذا الترتيب المنتظم ، من الممكن ان تبنى بلورة كاملة برص متكرر للوحدة البنائية وتعرف هذه الوحدات بالخلية البدائية (Primitive cell) . وهذه الخلايا البدائية تتضمن جميع المعلومات المطلوبة لاعادة بناء مواقع الذرات في

البلورة ولكن غالباً ما تأخذ هذه الخلايا اشكالاً غير مناسبة وبالنتيجة فالتعامل مع وحدة بنائية اكبر من ذلك وأكثر ملائمة حيث تتضمن هذه الوحدة جميع المعلومات وتأخذ شكلاً ابسط . وكمثال على ذلك الشكل (2.1a) الذي يوضح وحدة بنائية لترتيب ذري يعرف بنظام مكعب متمركز الاوجه (FCC) (face-centered-cubic) . والشكل (2.1b) يوضح ترتيب خلية بدائية متناظرة والاتجاهات التي تحدد شكل وحدة الخلية تكون متعامدة orthogonal بينما هذه الاتجاهات لاتكون متعامدة في الخلية البدائية . ويعرف طول حافة وحدة الخلية بثابت الشبيكة (lattice constant) .

ان اتجاه المستويات داخل البلورة يمكن ان يعبر عنها بدلالة ترتيب وحدة الخلية باستخدام معاملات ملر (Miller indices) يمكن اعتبار المتجهات المحددة لوحدة الخلية كمحاور اساسية لنظام معين كما مبين في الشكل (2-1a) اذ يمر مستوى ذري معين بنقطة الاصل لهذه المحاور ، ويمر مستوى اخر مواز لهذا المستوي ويقطع احداثيات المحاور في مواقع ذرية معينة والشكل (2.2) يبين مثالاً توضيحيا على ذلك . ان التقاطع على طول كل احداثي في هذا المثال هي 2 ، 3 ، 1 ذرة من نقطة الاصل وباخذ مقلوب هذه التقاطع تصبح الاعداد $\frac{1}{2}$ $\frac{1}{3}$ ، 1 وبعد اخذ المضاعف المشترك الاصغر يصبح بسط هذه الكسور 3 ، 2 ، 6 ويمكن التعبير عن هذا المستوى بدلالة معامل ملر (623) . اما التقاطع باتجاه السالب فيميز بوضع شارحة على العامل الذي يمثله (مثلا 2 ــ يكتب $\bar{2}$) .



الشكل 2.1 (a) وحدة الخلية لترتيب ذري بشكل مكعب متمركز الاوجه . تم اختيار وحدة الخلية في هذه الحالة بحيث تكون الاتجاهات المحددة للخلية متعامدة مع بعضها .
$\hat{a}$ ، $\hat{b}$ ، $\hat{c}$ ، و وحدة المتجهات لكل من هذه الاتجاهات .
(b) خلية بدائية للترتيب الذري نفسه



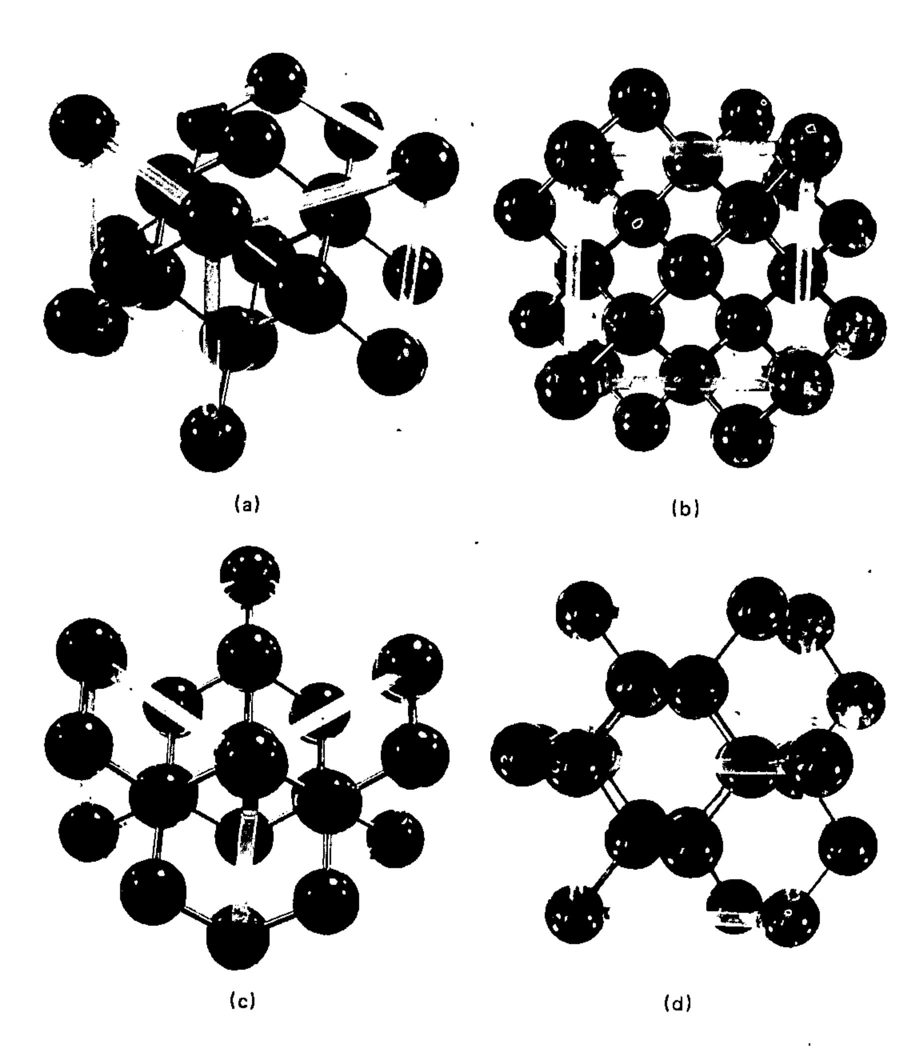
الشكل **2.2** مخطط توضيحي للمستوى داخل البلورة بدلالة معاملات ملر **(623)** .

يعبر عن الاتجاهات داخل البلورة عادة بدلالة المتجه . ويكتب هذا المتجه في اتجاه معين بالشكل الآتي : $h\hat{a} + k\hat{b} + l\hat{c}$ حيث $\hat{a}$ و $\hat{b}$ و $\hat{c}$ هي وحدة المتجهات على طول كل احداثي في المحاور كما في الشكل (a) 2.1 ,l,k,h هي إعداد صحيحة . وثم يمكن التعبير عن هذا الأتجاه بشكل (hkl) إن إستخدام الأقواس المربعة هنا لتمييز الأتجاه عن معاملات ملر ، مع ملاحظة بانه في حالة وحدة الخلايا المكعبة يكون الاتجاه [hkl] عمودياً على المستوى (hkl) .

واخيراً هناك مستويات داخل التركيب البلوري تكون متكافئة . وكمثال على ذلك في حالة شبيكة مكعبة متمركزة الاوجه والموضحة في الشكل (a) 2.1 ، الاختلاف بين المستويات (001) ، (010) ، (100) يعتمد على اختيار نقطة الاصل فقط . وتعرف هذه المجموعة المتكافئة بمجموعة {100} مع الاحتفاظ باستخدام القوس لهذا الغرض عادة . .

يبين الشكل(2.3 a) الترتيب الذري لعدد من اشباه الموصلات المهمة في تقنية الخلايا الشمسية حيث يبين الشكل الترتيب الذري لكل من بلورات السليكون (Si) وبلورات زرنخيد الكاليوم (GaAs) وبلورات كبريتيد الكادميوم (CdS) . ان المادتين الاخيرتين هما من اشباه الموصلات المركبة (compound) وتحتويان على اكثر من نوع واحد من الذرات في تركيبها البلوري . ان الترتيب البلوري من هذا النوع عادة يعرف بشبيكة الماس (diomond lattice) او شبيكة زنك بلند (zincblend lettice) (لاشباه الموصلات المركبة مثل زرنخيد الكاليوم GaAs))

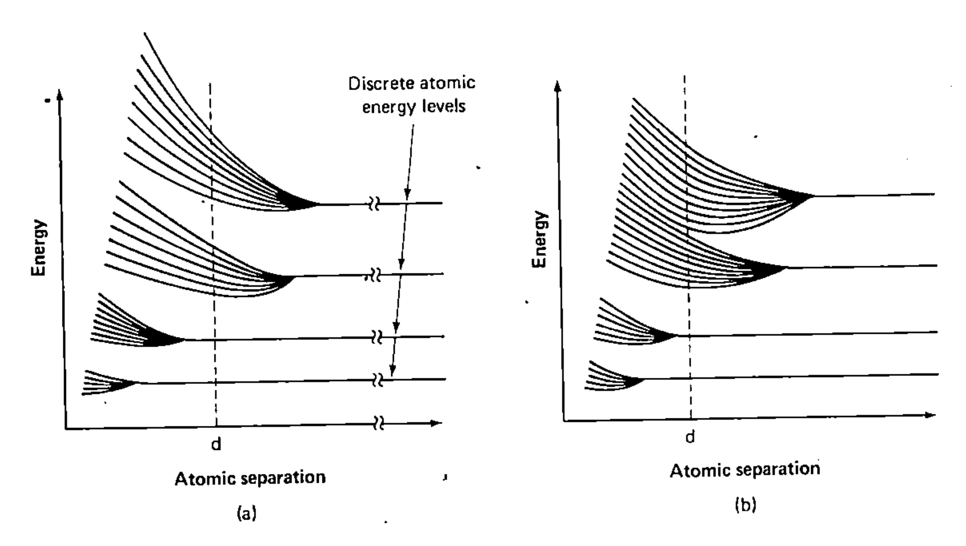
ووحدة الخلية هي مكعبة كما تبين من الشكل . والشكل (b) 2.3 الى (d) يبين الترتيب الذري عند النظر الى الشبيكة من اتجاهات مختارة . ان هذه الاختلافات الجوهرية في الترتيب الفيزيائي للذرات في مختلف الاتجاهات تحدث تغيرات مباشرة في عمل الخلية الشمسية (كما في تمرين 2.2) .



الشكل 2.3 (a) نموذج شبيكة الماس والتي تمثل الترتيب الذري لعدد من اشباه الموصلات المهمة في تكنولوجيا الخلايا الشمسية وكذلك الخطوط المحددة لوحدة الخلية . (b) منظر للترتيب الذري نفسه عند النظر في اتجاه [100] . (c) و (d) منظران للاتجاهين [111] و [110] على التوالي .

FORBIDDEN ENERGY GAPS 2.3 فجوات الطاقة المحظورة

يمتلك الالكترون في فضاء خال مدى مستمراً ومميزاً من مناسيب الطاقة الخاصة به . والالكترونات المرتبطة مع الذرات المنفردة لها مجموعة محددة من مناسيب الطاقة المسموح بها والمنفصلة بعضها عن بعض وعندما تتقارب مجموعة من الذرات من بعضها فان المناسيب تنتشر خارجاً في حزم من الطاقة المسموحة كما هو مبين في الشكل 2.4 . وعندما تكون الذرات في تراكيب منسقة كما في البلورات . وتكون بينها مسافات بينية مميزة يوضح الشكل (a) 2.4 حالة البلورة عندما تكون المسافة المميزة بين الذرات d ، والتي عندها تملك البلورة حزماً من مراتب الطاقة المسموحة للالكترونات (تناظر مستويات الطاقة الذرية) ومنفصلة بالفجوة المحظورة . اما الشكل (b) 2.4 فيبين حالة مختلفة حيث تتداخل الحزم لتصبح مستويات الطاقة المسموحة مستمرة عند قيمة d المميزة لمختلف المواد البلورية .



الشكل 2.4 مخطط توضيحي لمناسيب الطاقة المسموحة للالكترون في ذرة منفردة . عند تجمع الذرات في نسق بلوري ينشطر كل منسوب الى حزم من مراتب الطاقة

(a) المسافة المميزة (d) للذرات داخل البلورة لها قيمة بحيث ان حزم الطاقة المسموحة للالكترونات منفصلة عن بعضها بحزم الطاقة المحظورة .

(b) في هذه الحالة يكون موقع (d) بحيث تكون الحزم العليا متداخلة بعضها مع بعض .

2.4 احتمالية انشغال مراتب الطاقة المسموحة .

PROBABILITY OF OCCUPATION OF ALLOWED STATES

عند درجات الحرارة الواطئة . يشغل الالكترونات اوطأ مراتب الطاقة الممكنة . ولاول وهلة يتوقع الانسان أن حالة التوازن في البلورة تحدث عندما تكون الالكترونات ككل في اوطأ منسوب مسموح به . ولكن مبدأ باولي للانفراد في الفيزياء (Pauli exclusion Principle) يمنع حدوث ذلك .

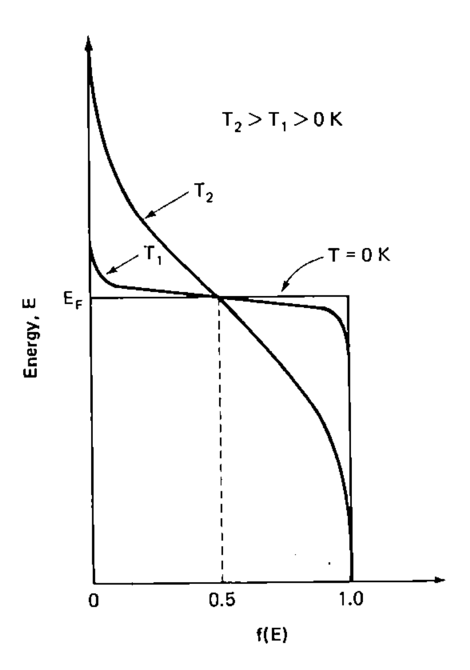
عندما تزيد درجة الحرارة تحصل بعض الالكترونات على طاقة تزيد على طاقة منسوب فيرمي ، فاحتمالية انشغال الالكترون للمرتبة المسموحة لاي طاقة E يمكن حسابها باستخدام القوانين الاحصائية مع الاخذ بنظر الاعتبار القيود المفروضة حسب مبدأ باولي للانفراد (مراجع 2.1 الى 2.4) والنتيجة هي دالة توزيع فرمي f (E) المعطاة بـ :

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E - E_F)/kT}} \qquad (2.1)$$

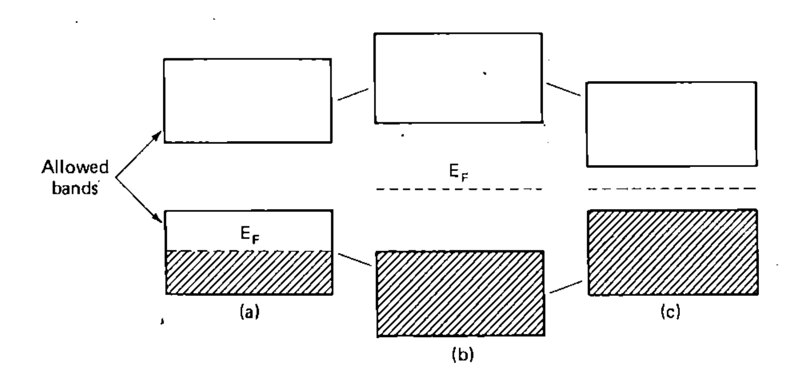
حيث k ثابت بولتزمان و T درجة الحرارة المطلقة وهذه الدالة مرسومة في الشكل 2.5 . وكما تلاحظ عند درجة الصفر المطلق $f(E)$ تساوي واحد كما هو متوقع والى ان تصل الى طاقة تساوي طاقة فيرمي E_F ويكون صفراً عند طاقة اعلى من E_F

وعندما تتزايد درجة الحرارة يحدث تغير في التوزيع ان تملك مرتبة الطاقة التي اعلى من E_F احتمالية معينة للانشغال اما في مرتبة الطاقة الاقل من E_F فتملك احتمالية معينة تكون فارغة

اصبح الان بالامكان وصف الاختلافات الموجودة بين المعادن والعوازل واشباه الموصلات بدلالة التركيب الحزمي للالكترونات . فللمعادن تراكيب الكترونية بحيث تقع E_F ضمن الحزمة المسموحة (الشكل 2.6) . قد يرجع سبب ذلك الى عدم توفر الاعداد الكافية من الالكترونات لتشغيل الحزم الموجودة عندما يكون التركيب الالكتروني للحزم كما هو في الشكل 2.4(a) . او ربما هناك تداخل بين الحزم كما في الشكل 2.4(b) . اما في العوازل فتكون حزمة الطاقة مشغولة تماما بالالكترونات وهناك فجوة محظورة كبيرة بين هذه الحزمة والحزمة الاعلى منها والتي تكون خالية من الالكترونات عند درجات الحرارة الواطئة . ومما سبق يتبين ان E_F في العوازل تكون داخل الفجوة المحظورة (شكل 2-6) .



الشكل 2.5 دالة توزيع فرمي ـ ديراك . المراتب الموجودة فوق مستوى فرمي E_F لها احتمالية واطئة لتكون مشغولة بالالكترونات بينما المراتب التي تقع تحتها على الاغلب تكون مشغولة .



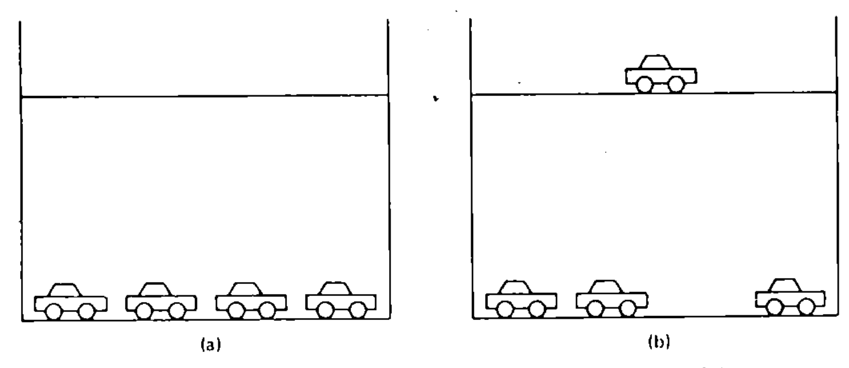
الشكل 2.6 رسم تخطيطي لعملية انشغال المراتب المسموحة بالالكترونات في
(a) المعدن
(b) العوازل
(c) اشباه الموصلات

من الواضح ان الحزمة الخالية من الالكترونات تماماً لا تستطيع المساهمة في سريان التيار في البلورة والاعجب من ذلك ان الحزمة المملوءة بالالكترونات تماما لاتستطيع ذلك ايضاً . ليستطيع الالكترون المساهمة في هذا السريان يجب ان ينتزع جزء من الطاقة من المجال المسلط ، وهذا غير محتمل في حزمة مشغولة تماماً وذلك لعدم وجود مراتب مسموحة فارغة في المنطقة المجاورة للالكترون الذي يمكن اثارته ، ولذا يكون العازل غير موصل للكهرباء بينما المعادن التي تحتوي على وفرة من هذه الحالات الفارغة تكون موصلة للكهرباء .

اما شبه الموصل فهو عازل بفجوة محظورة ضيقة . يكون غير موصل للكهرباء عند درجات الحرارة الواطئة . اما عند درجات الحرارة العالية فيحدث تغيير كافٍ في دالة توزيع (فيرمي – ديراك) بحيث تصبح بعض مراتب الطاقة في الحزمة المشغولة (حزمة التكافؤ) غير مشغولة وتكون بعض المراتب في الحزمة العليا (حزمة التوصيل) مشغولة . ان الالكترونات الموجودة في حزمة التوصيل التي تحتوي عدد أكبر من المراتب غير المشغولة تستطيع الان ان تسهم في سريان التيار ، وفي نفس الوقت تترك مراتب طاقة غير مشغولة في حزمة التكافؤ مما يسبب مساهمة اضافية في سريان التيار من الالكترونات المتبقية من هذه الحزمة .

2.5 الالكترونات والفجوات ELECTRONS AND HOLES

يمكن توضيح عملية جريان التيار في شبه الموصل بمثال بسيط ومعقول وذلك بتمثيل مستويين مثاليين لمحطة وقوف السيارات (شكل 2.7) لنأخذ الحالة التي عندما يكون المستوى الاسفل من هذه المحطة مشغولاً تماماً بالسيارات والمستوى الاعلى فارغ تماماً كما في الشكل (a) 2.7 . وهذا يعني انه لايوجد مجال لاي سيارة لتتحرك في المستوى الاسفل . واذا تحركت احدى هذه السيارات من المستوى الاسفل الى المستوى الاعلى كما في الشكل (b) 2.7 فهذه السيارة تكون حرة الحركة وكيفما تشاء ، وهذه الحالة مماثلة تماماً لحالة الالكترون عندما يكون في حزمة التوصيل في شبة الموصل ، وفي نفس الوقت ستترك هذه السيارة مكاناً فارغاً في المستوى الاسفل ، والسيارات القريبة لهذا المكان تستطيع ان تتحرك الى هذا المكان تاركة مكانها فراغاً جديداً . لذا فان حركة السيارات في المستوى الاسفل اصبحت ممكنة وهذه الحالة مماثلة لحالة الالكترونات عندما تكون في حزمة التكافؤ . ويكون من الافضل وصف حركة السيارات في المستوى الاسفل كحركة ناتجة من عدد السيارات ممكن وصفها بدلالة المكان الفارغ المفرد . وكذلك وبنفس الطريقة في البلورة يكون من الاسهل وصف الحركة بدلالة حركة المراتب الفارغة في حزمة التكافؤ . في كثير من الحالات تعامل حركة الحالة الفارغة هذه كحركة



الشكل 2.7 محطة وقوف السيارات تمثل عمليات التوصيل في شبة الموصل
(a) الحركة غير ممكنة
(b) الحركة ممكنة في كل من المستوى الاسفل والاعلى .

جسيم فيزيائي موجب الشحنة ويعرف عموماً بالفجوة (hole) وعليه يبين ان جريان التيار في شبه الموصل يعزى الى مجموع حركة الالكترونات في حزمة التوصيل والفجوات في حزمة التكافؤ .

2-6 حركة الالكترونات والفجوات

DYNAMICS OF ELECTRONS AND HOLES

ان حركة الالكترونات والفجوات في اشباه الموصلات تحت تأثير القوى المسلطة تختلف عن حركة الجسيمات في الفراغ . وذلك لانه اضافة الى القوة المسلطة يوجد دائماً تأثير قوة دورية لذرات البلورات . على كل حال فان نتائج ميكانيك الكم تبين امكانية تطبيق المفاهيم المستخدمة لحركة الجسيمات في الفراغ على الالكترونات والفجوات مع بعض التحويرات البسيطة .

فعلى سبيل المثال عندما تقع الالكترونات في حزمة التوصيل في البلورة فان قانون نيوتن للحركة يصبح بشكل

$$F = m_e^* a = \frac{dp}{dt} \qquad (2.2)$$

حيث F هي القوة المسلطة و m_e^* الكتلة الفعالة للالكترون والتي تتضمن تأثير القوة الدورية للشبيكة الذرية و p زخم بلوري شبيه بالزخم في الفضاء الخالي . وفي حالة الالكترون الحر تكون العلاقة بين الطاقة والزخم حسب قانون القطع الناقص : (parabolic law)

$$E = \frac{p^2}{2m} \qquad (2.3)$$

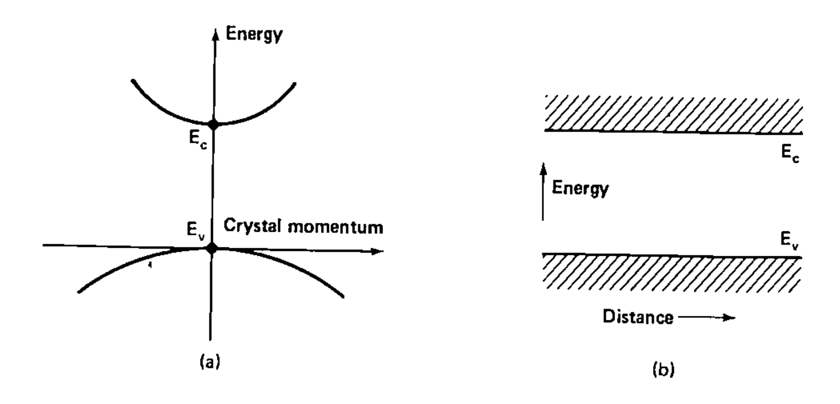
اما في حالة حركة حاملات الشحنة في اشباه الموصلات فتكون الحالة اكثر تعقيداً . في بعض اشباه الموصلات تطبق نفس القوانين المذكورة اعلاه على الالكترونات في حزمة التوصيل وعند طاقات قريبة من الطاقة الدنيا (E_c) في هذه الحزمة :

$$E - E_c = \frac{p^2}{2m_e^*} \qquad (2.4)$$

وهناك علاقة مشابه للفجوات قرب الطاقة القصوى في حزمة التكافؤ (E_v) وهي

$$E_v - E = \frac{p^2}{2m_h^*} \qquad (2.5)$$

يوضح الشكل 2.8 العلاقتين اعلاه ومثل هذه اشباه الموصلات عادة تعرف باشباه الموصلات فان الفجوة المباشرة (direct band gap semiconductors) واكثر نماذجها المهمة تكنولوجياً هو شبه الموصل المركب GaAs .



الشكل 2.8 (a) علاقات الطاقة ـ الزخم البلوري قرب حافة حزمة التوصيل للالكترونات والفجوات في حزمة التكافؤ لشبه الموصل ذي الفجوة المباشرة (b) التمثيل الفضائي المناظر للطاقات المسموحة في شبه الموصل

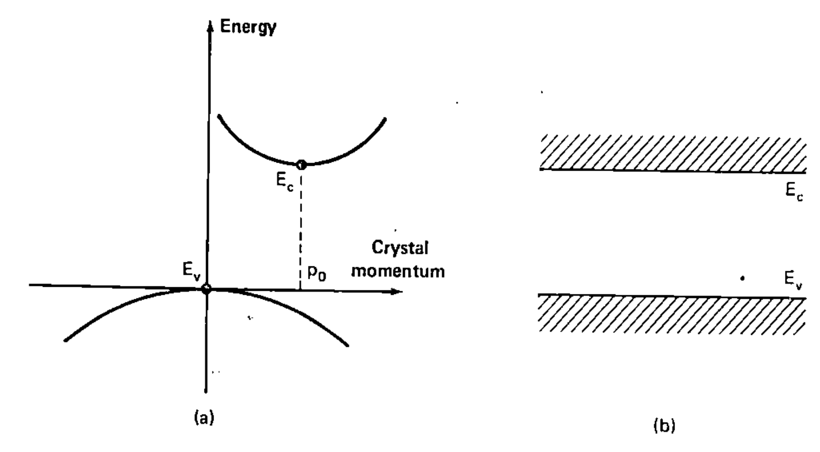
اما في اشباه الموصلات الاخرى فان الطاقة الدنيا لحزمة التوصيل تقع عند قيمة معينة للزخم البلوري ويتضح ذلك بالعلاقة

$$E - E_c = \frac{(p - p_0)^2}{2m_e^*} \qquad (2.6)$$

وتطبق العلاقة المماثلة للفجوات الموجودة في حزمة التكافؤ

$$E_v - E = \frac{(p - p_0')^2}{2m_h^*} \qquad (2.7)$$

اذا كان $p_0 = p_0'$ فان شبه الموصل يملك فجوة مباشرة اما اذا كان $p_0 \neq p_0'$ فانه يملك فجوة تعرف بالفجوة غير المباشرة (indirect-band-gap) واكثر نماذجها الشائعة هما Ge و Si واللذان يعتبران من اشباه الموصلات ذات الفجوة غير المباشرة . وفي كل من هذين النموذجين تكون $p_0' = 0$ غير ان p_0 له قيمة معينة وهذه الحالة موضحة في الشكل 2.9 .



الشكل 2.9 علاقة الطاقة ـ الزخم البلوري قرب حافة الحزمة لشبه الموصل ذي الفجوة غير المباشرة والتمثيل الفضائي لحزمة الطاقة موضحة ايضاً في الشكل

مع ملاحظة ان التمثيل الشائع لعلاقات الطاقة اي رسم الطاقة كدالة للمسافة في نبائط اشباه الموصلات (كما موضح في الشكلين 2.8 و 2.9) لاتميز اشباه الموصلات ذوات الفجوة المباشر عن ذوات الفجوة غير المباشرة .

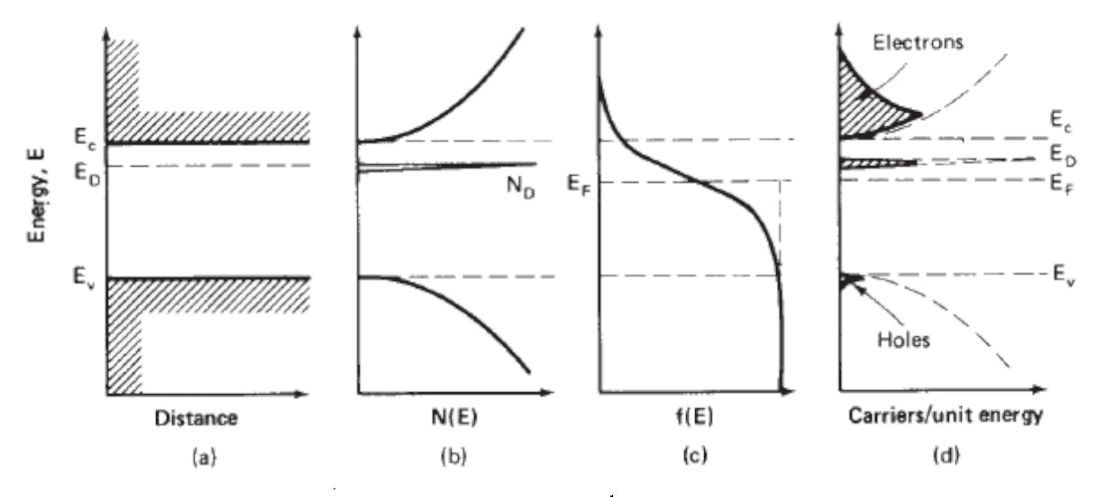
2-7 كثافة الطاقة للمراتب المسموحة
ENERGY DENSITY OF ALLOWED STATES

عدد المراتب المسموحة لوحدة الحجم في شبه موصل تساوي صفراً في الفجوة المحظورة ولا تساوي صفراً في الحزم المسموحة والسؤال هنا كم هو عدد المراتب المسموحة للالكترونات التي تتوزع في الحزم المسموحة .

يمكن ايجاد الجواب بسهولة وبصورة مقبولة (المراجع 2.1 و 2.4) على الاقل للمراتب التي تكون قرب حافات الحزم المسموحة وتعامل عندها الحالات كحاملات حرة ، فان عدد المراتب المسموحة لوحدة الحجم والطاقة ، N(E) ، عند طاقة E وقرب حافة حزمة التوصيل (عند غياب تباين الخواص) تعطى بالعلاقة

$$N(E) = \frac{8\sqrt{2}\pi m_e^{*3/2}}{h^3} (E - E_c)^{1/2} \tag{2.8}$$

حيث h ثابت بلانك . يمكن تطبيق علاقة مشابهة للمراتب القريبة من حافة حزمة التكافؤ . وهذه التوزيعات للمراتب المسموحة موضحة في الشكل (b) 10-2 .



الشكل 2.10 (a) تمثيل الحزمة للشبه الموصل
(b) كثافة الطاقة المثلة للمراتب المسموحة للالكترونات
(c) احتمالية انشغال هذه الحالات
(d) توزيع الطاقة الناتجة للالكترونات والفجوات . لاحظ ان اكثرها قد تجمعت قرب حافة الحزم الخاصة بها .

2.8 كثافات الالكترونات والفجوات
DENSITIES OF ELECTRONS AND HOLES

بعد معرفة كثافة المراتب المسموحة [المعادلة (2.9)] واحتمالية انشغال هذه المراتب [المعادلة (2.1)] اصبح من السهل حساب توزيع الطاقة الفعلية للالكترونات والفجوات. والنتائج مبينة تخطيطياً في الشكل 2.10 .

وبالرجوع الى طبيعة دالة توزيع فرمي - ديراك يتبين ان اغلب الالكترونات في حزمة التوصيل والفجوات في حزمة التكافؤ تتجمع قرب الحافات. ويمكن ايجاد العدد الكلي للحاملات في كل حزمة باجراء عملية التكامل، فعدد الالكترونات في حزمة التوصيل لوحدة الحجم من البلورة، n، يعطى بالمعادلة التالية :

$$n = \int_{E_c}^{E_{c\,max}} f(E)\, N(E)\, dE \qquad (2.9)$$

وبما ان E_c أكبر من E_F بعدد من kT فان دالة $f(E)$ لحزمة التوصيل تقرب الى

$$f(E) \approx e^{-(E-E_F)/kT} \qquad (2.10)$$

ويحل محل الحد الاعلى، $E_{c\,max}$، باللانهاية مع احتمال حدوث خطأ قليل ولذا

$$\begin{aligned} n &= \int_{E_c}^{\infty} \frac{8\sqrt{2}\,\pi m_e^{*3/2}}{h^3} (E-E_c)^{1/2} e^{(E_F-E)/kT} dE \\ &= \frac{8\sqrt{2}\,\pi}{h^3} m_e^{*3/2} e^{E_F/kT} \int_{E_c}^{\infty} (E-E_c)^{1/2} e^{-E/kT} dE \end{aligned} \qquad (2.11)$$

وبتغير متغيرات التكامل الى $x = (E-E_c)/kT$

لتعطي

$$n = \frac{8\sqrt{2}\,\pi}{h^3} (m_e^* kT)^{3/2} e^{(E_F-E_c)/kT} \int_0^{\infty} x^{1/2} e^{-x} dx \qquad (2.12)$$

فان التكامل في هذه المعادلة من النوع القياسي ويساوي $\sqrt{\pi}/2$ لذا

$$n = 2\left(\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2}\right)^{3/2} e^{(E_F - E_c)/kT} \qquad (2.13)$$

$$\boxed{n = N_C e^{(E_F - E_c)/kT}} \qquad (2.14)$$

N_c تكون ثابتة عند ثبوت درجة الحرارة المطلقة T وتعرف بالكثافة الفعالة للمراتب في حزمة التوصيل ويمكن حسابها بالمقارنة بين المعادلتين (2.13) و (2.14) . وبالطريقة نفسها فان عدد الفجوات لوحدة الحجم في حزمة التكافؤ من البلورة يعطي بـ :

$$\boxed{p = N_V e^{(E_v - E_F)/kT}} \qquad (2.15)$$

حيث N_V هي الكثافة الفعالة للمراتب في حزمة التكافؤ .

في الحالة المثالية لشبه موصل نقي خال من العيوب وباهمال التأثيرات السطحية n تساوي P وذلك لان كل الكترون في حزمة التوصيل يترك فراغاً او فجوة في حزمة التكافؤ . اذن

$$n = p = n_i \qquad (2.16)$$

$$np = n_i^2 = N_C N_V e^{(E_v - E_c)/kT}$$

$$= N_C N_V e^{-E_g/kT} \qquad (2.17)$$

حيث تعرف n_i بالتركيز الذاتي و E_g هي عرض الفجوة المحظورة بين حزمة التوصيل وحزمة التكافؤ كما يتبين ايضا من المعادلة (2.16) ان

$$N_C e^{(E_F - E_c)/kT} = N_V e^{(E_v - E_F)/kT} \qquad (2.18)$$

وبذلك تكون

$$E_F = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{kT}{2} \ln \left(\frac{N_V}{N_C}\right) \qquad (2.19)$$

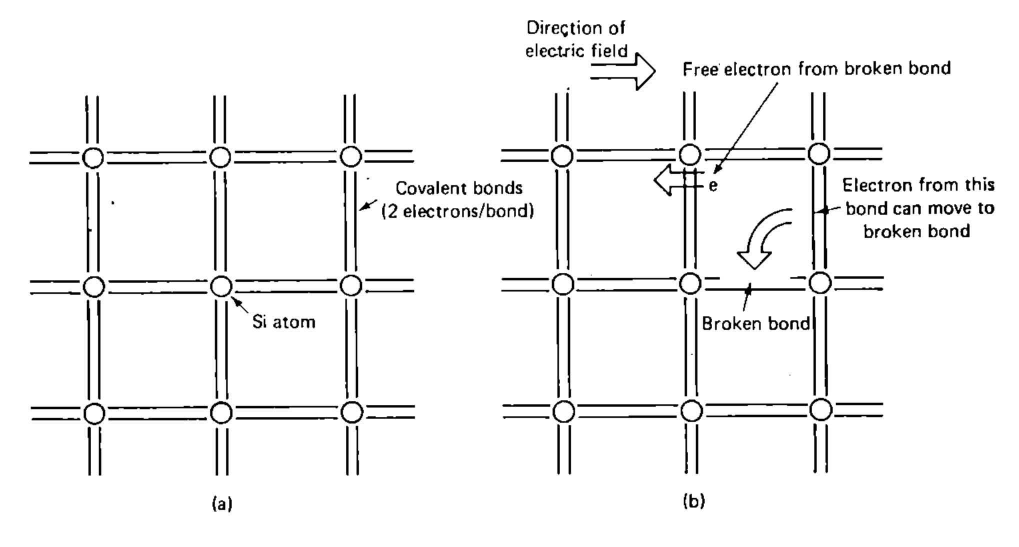
وهكذا فان منسوب فرمي في شبه موصل نقي يقع تقريباً في منتصف الفجوة المحظورة . وتزحزح فقط بمقدار الاختلاف في الكثافة الفعالة للمراتب الموجودة في حزمتي التوصيل والتكافؤ .

2-9 نموذج التأصر في شبه موصل المجموعة الرابعة
BOND MODEL OF A GROUP IV SEMICONDUCTOR

تم لحد الان وصف بعض اهم الخصائص الاساسية لشبه الموصل ويمكن ان ينظر الى هذه الخصائص من وجهات نظر مختلفة لاشباه الموصلات المنتمية الى المجموعة الرابعة IV في الجدول الدوري للعناصر الكيمياوية . بالرغم من ان الشرح التالي لنموذج التآصر لايكون صحيحاً تماماً لكل المواد شبه الموصلة ولكنه يساعد على فهم تأثيرات الشوائب على الخصائص الالكترونية لاشباه الموصلات باسلوب بسيط .

ان خاصية التركيب البلوري لشبه الموصل من المجموعة الرابعة في الجدول الدوري موضحة في الشكل 2.3 ويوضح الشكل 2.11(a) الرسم التخطيطي في بعدين لشبيكة السليكون حيث كل ذرة سليكون تترابط مع اربع ذرات مجاورة بواسطة اواصر تساهمية وكل اصرة تساهمية تحتاج الى الكترونين . والسليكون يملك اربعة الكترونات تكافوئية ، لذا فان كل اصرة تساهمية تشارك الكتروناً من الذرة المركزية مع الكترون اخر من الذرة المجاورة .

وبالنسبة للحالة المبينة في الشكل 2.1(a) فان هذا النوع من شبه الموصل لايكون موصلاً للكهرباء ، الا انه عند الدرجات الحرارية العالية ، فان بعض الالكترونات تتمكن من الحصول على طاقة كافية لكسر الاصرة وتصبح حرة كما في الشكل 2.11(b) وفي هذه الحالة تكون الالكترونات المتحررة حرة الحركة في البلورة فتسهم في جريان التيار . والالكترونات في الاواصر التساهمية المجاورة للآصرة المكسورة تستطيع ان تتحرك ايضاً الى الفراغ الناتج في هذه الآصرة مخلفة وراءها آصرة مكسورة اخرى . وهذه العملية بدورها تسهم في جريان التيار .



الشكل 2.11 مخطط توضيحي الشبيكة السليكون
(a) الاواصر التساهمية غير المكسورة
(b) احدى الاواصر المكسورة وتبين حركة الالكترون الطليق وحركة الالكترون المقيد القريب الى الفجوة المتروكة .

بالرجوع الى المصطلحات المستخدمة في الفقرات السابقة فأن الالكترونات المحررة من الاصرة التساهمية تمثل حزمة التوصيل بينما تمثل الالكترونات المرتبطة حزمة التكافؤ . اما الآصرة المكسورة فتمثل الفجوة في حزمة التكافؤ . إن ادنى طاقة لازمة لتحرير الألكترون من الآصرة التساهمية هي عرض الحزمة المحظورة في شبه الموصل .

أنموذج التآصر هذا مهم ، خاصة عند دراسة تأثير الشوائب على الخصائص الالكترونية للسليكون . في البند الآتي نوضح تأثير الشوائب الخاصة المعروفة بالمطعمات (dopant) .

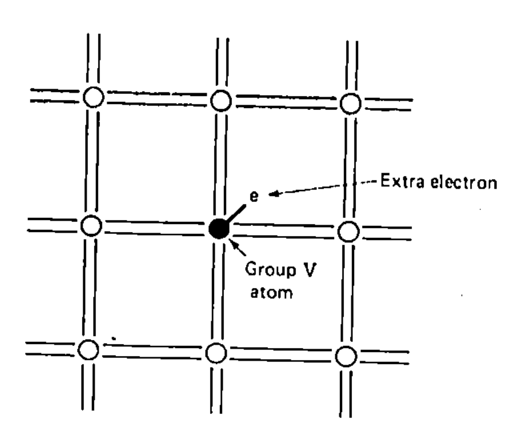
2-10 شوائب المجموعتين الثالثة والخامسة .

GROUP III AND V DOPANTS

تدخل الذرات الشائبة في التركيب البلوري للمواد الصلبة عادة بطريقتين فإما تتخلل الشوائب في مواضع محصورة بين ذرات البلورة المضيفة ، وفي هذه الحالة تعرف بالشوائب المتخللة (interstitial impurities) أو تتبادل مع ذرات البلورة

المضيفة بالتعاقب محافظة على الترتيب الذري للتركيب البلوري ، وفي هذه الحالة تعرف بالشوائب المعوضة (substitutional impurities) .

إن ذرات عناصر المجموعتين الثالثة والخامسة من الجدول الدوري تعمل كشوائب معوضة في السليكون والشكل 13-2 يبين مقطع لتركيب شبيكي عندما تحل شائبة خماسية (مثل الفسفور) محل ذرة سليكون . وأربع من الألكترونات التكافئية لهذه الشائبة تشترك في الأواصر التساهمية بينما الألكترون الخامس يكون في حالة مختلفة فهو لا يشترك في عملية التأثر وهذا يعني انه غير موجود في حزمة التكافؤ . وكما موضح في الشكل فأنه مرتبط مع ذرة المجموعة الخامسة ، أي أنه لا يكون حر الحركة خلال الشبيكة البلورية ، ولذا فهو غير موجود ايضاً في حزمة التوصيل .



الشكل 2.12 مقطع من شبيكة السليكون عندما تحل ذرة من شوائب المجموعة الخامسة محل ذرة السليكون .

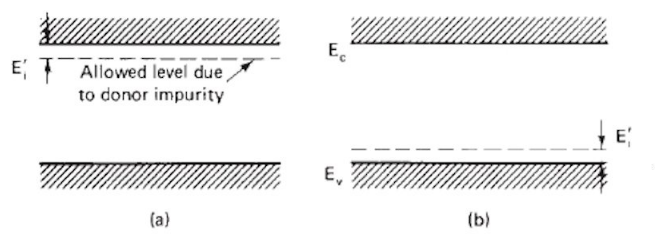
فمن المتوقع أن كمية صغيرة من الطاقة تكفي لتحرير هذا الألكترون الاضافي مقارنة مع تلك الطاقة اللازمة لتحرير الألكترونات المشاركة في الأواصر التساهمية ، وهذا مايحدث في الواقع . ومن الممكن تقدير الطاقة التقريبية اللازمة وذلك بملاحظة التشابه بين هذا الالكترون والألكترون المرتبط بذرة الهايدروجين . العلاقة الخاصة بطاقة التأين (الطاقة اللازمة لتحرير الألكترون من الذرة) لذرة الهايدروجين (المراجع 2.1 الى 2.4) هي

$$E_i = \frac{m_0 q^4}{8\epsilon_0^2 h^2} = 13.6\,(\text{الكترون فولت})(\text{eV}) \qquad (2.20)$$

حيث m_0 كتلة السكون للالكترون q شحنة الألكترون و ϵ_0 ثابت السماحية (permittivity) للفراغ . ان الألكترون الزائد حول ذرة المجموعة الخامسة التي تملك شحنة موجبة واحدة غير متعادلة . ولذا فان التعبير عن طاقة التأين في هذه الحالة تكون مشابهة لحالة ذرة الهيدروجين . ونصف قطر مدار الدوران يكون اكبر بكثير من المسافة البينية للذرات لذلك فان ϵ_0 في المعادلة يجب أن تستبدل بسماحية السليكون ($11.7\epsilon_0$) . وبما أن الألكترون الدوار يتأثر بالقوة الدورية لشبيكة السليكون ، لذا فأن كتلة الألكترون يجب أن تستبدل بكتلة الألكترون الفعالة ($m_e^*/m_0 \simeq 0.2$ بالنسبة للسليكون) وبهذا فان الطاقة اللازمة لتحرير الألكترون الخارجي

$$E_i' \approx \frac{13.6(0.2)}{(11.7)^2} \approx 0.02 \text{ eV} \qquad (2.21)$$

وهذه اقل بكثير من طاقة الفجوة المحظورة للسليكون والتي تساوي 1.1 الكترون فولت . يكون الالكترون الطليق عادة في حزمة التوصيل بينما يقع الألكترون الزائد المرتبط بذرة المجموعة الخامسة عند طاقة E_i' تحت حافة حزمة التوصيل كما موضح في الشكل 2.13(a) ، مع ملاحظة أن موقع E_i هو منسوب مسموح به للطاقة ضمن الفجوة المحظورة وبالطريقة نفسها فإن الشائبة من المجموعة الثالثة لاتملك الكترونات تكافئية كافية لتشترك بأربع أواصر تساهمية وبذلك تحدث فجوة مرتبطة بذرة المجموعة الثالثة . والطاقة اللازمة لتحرير هذه الفجوة تشابه تلك المعطاة بالمعادلة (2.21) . ولذا فإن ذرة المجموعة الثالثة تحدث مراتب طاقة مسموحة داخل الفجوة المحظورة وفوق حزمة التكافؤ مباشرة كما مبين في الشكل 2.13(b) .



الشكل 2.13 (a) طاقة المراتب المسموحة داخل الفجوة المحظورة نتيجة شوائب المجموعة الخامسة المعوضة (b) مراتب الطاقة المناظرة لشوائب المجموعة الثالثة (III) .

2-11 كثافات حامل الشحنة CARRIER DENSITIES

بما أن الطاقة اللازمة لتحرير الالكترون الزائد من ذرات المجموعة الخامسة صغيرة ، فمن المتوقع عند درجة حرارة الغرفة حصول اغلب هذه الألكترونات على هذه الطاقة ، حيث تترك أغلبها ذرات المجموعة الخامسة بشحنتها الموجبة ، لتصبح حرة الحركة ضمن البلورة . وبما أن ذرات المجموعة الخامسة تمنح الألكترونات لحزمة التوصيل فتدعى بالمانحات (*donors*) ويمكن الحصول على فكرة عن عدد الالكترونات الحاصلة على هذا المقدار الصغير من الطاقة المطلوبة بالرجوع الى الشكل 2.14 . اذ من الملاحظ أن شكل دالة توزيع فرمي ـ ديراك تشير بأن هناك احتمالية صغيرة لتصبح المناسيب المانحة مشغولة[1] . وهذا يعنى أن أغلب الالكترونات قد تركت الجزيئة المانحة لتصبح في حزمة التوصيل . في هذه الحالة يمكن ايجاد العدد الكلي للألكترونات في حزمة التوصيل والفجوات في حزمة التكافؤ اذا أخذنا بنظر الاعتبار حالة تعادل الشحنة في شبه الموصل أي :

$$p - n + N_D^+ = 0 \qquad (2.22)$$

حيث p كثافة الفجوات في حزمة التكافؤ و n كثافة الألكترونات في حزمة التوصيل و N_D^+ كثافة المانحات المتأينة (مثل : الشحنات الموجبة التي تتركها الألكترونات المتحرة وراءها) ومن الممكن الحصول على معادلة أخرى مهمة من المعادلة (2.17) وهي :

$$np = n_i^2 \qquad (2.23)$$

هذه العلاقة أعم من حالة اشباه الموصلات النقية التي تم مناقشتها سابقاً . عند حل المعادلات (2.14) و (2.15) و (2.22) بالربط مع دالة توزيع فيرمي ـ ديراك يمكن الحصول على قيم دقيقة لكل من n و p و N_D^+ للحالات العامة . ومع هذا ، فان اغلب الحالات في هذا الكتاب تستخدم الحل التقريبي والمختصر والبسيط وتعطى نتائج وافية ودقيقة .

---

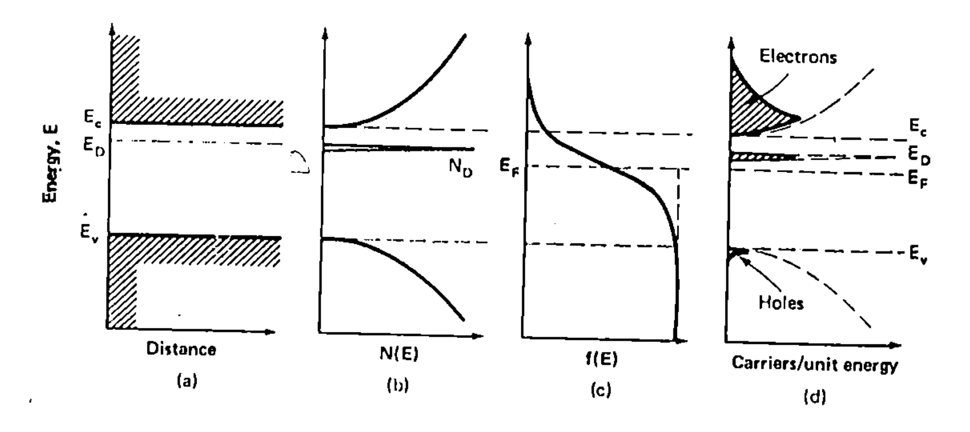
(1) تختلف الاحصائيات التي تحدد انشغال منسوب المانح قليلاً في واقع الحال عن التي تحدد إنشغال المناسيب ضمن الحزمة المسموحة . حالما ينشغل منسوب المانح بالكترون واحد باي "برمين" تتعادل الشحنة الموجبة الفعالة على الذرة المانحة المركزية . وبذلك لايوجد هناك أي تجاذب لأنشغال الكترون ثاني ببرم معاكس . وهذا يسبب تحويراً طفيفاً لمعادلة فرمي ديراك لاحتمالية الأنشغال . لم يؤخذ هذا التحوير بنظر الأعتبار في هذا الكتاب .

بما أن أغلبية الذرات المانحة تتأين ، فإن N_D^+ تساوي تقريباً الكثافة الكلية للمانحات N_D ، ومن المعادلة (2.22) n تكون اكبر من p وتكون اكبر بكثير عندما تكون N_D كبيرة جداً . ولذا فإن الحل التقريبي يكون :

$$N_D^+ \approx N_D$$
$$n \approx N_D \qquad (2.24)$$
$$p \approx \frac{n_i^2}{N_D} \ll n$$

وتحدث حالة مماثلة بالنسبة للشوائب من المجموعة الثالثة . اذ ان هذا النوع من الشوائب يتخلى بسهولة عن فجواته الزائدة إلى حزمة التكافؤ او تستلم الكترونا من هذه الحزمة . ونتيجة لذلك يدعى هذا النوع من الشوائب بالقابلات (accepters) والقابل المتأين يملك شحنة سالبة . ولذا

$$p - n - N_A^- = 0 \qquad (2.25)$$



الشكل (2.14) (a) تمثل الحزمة لشبه الموصل من المجموعة الرابعة مع الشوائب التعويضية من المجموعة الخامسة بكثافة N_D لوحدة الحجم (b) كثافة الطاقة المناظرة للمراتب المسموحة (c) احتمالية انشغال هذه المراتب (d) توزيع الطاقة الناتجة عن الكترونات االفجوات (تمثل الحالة المبينة في الشكل درجات الحرارة العالية اما في درجات حرارية متوسطة فتكون احتمالية إنشغال الحالات المانحة بالألكترونات اقل من ذلك ,) الشكل 2.15 طاقة مستوى فرمي كدالة لتركيز المانحات والقابلات .

حيث N_A^- هي كثافة القابلات المتأينة . والحل التقريبي لهذه الحالة هو :

$$N_A^- \approx N_A$$
$$p \approx N_A \tag{2.26}$$
$$n \approx \frac{n_i^2}{N_A} \ll p$$

2-12 موقع مستوى فيرمي في أشباه موصلات مطعمة

LOCATION OF FERMI LEVEL IN DOPED SEMICONDUCTORS

يمكن تطبيق معادلات كثافة الألكترونات والفجوات المشتقة من المعادلتين 2.14 و 2.15 في حالات أعم من أشباه الموصلات النقية . وفي حالة تطعيم المادة بالشوائب المانحة تدعى المادة شبه الموصلة بالنوع السالب (n-type) وتكون المعادلة على الشكل التالي :

$$n = N_D = N_C e^{(E_F - E_c)/kT} \tag{2.27}$$

أو

$$E_F - E_c = kT \ln\left(\frac{N_D}{N_C}\right) \tag{2.28}$$

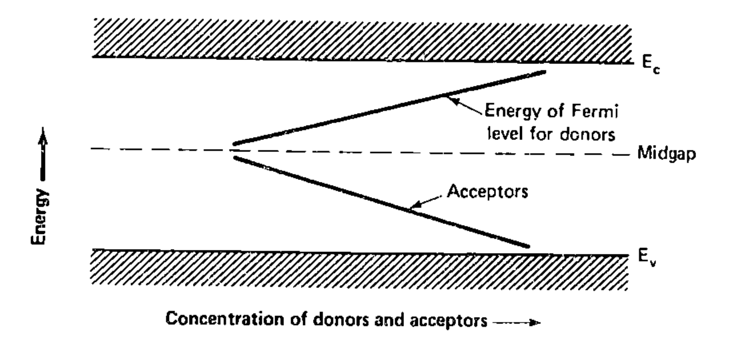
وبالطريقة نفسها للمادة المطعمة بالقابلات (النوع الموجب) *p-type*

$$p = N_A = N_V e^{(E_v - E_F)/kT} \tag{2.29}$$

أو

$$E_v - E_F = kT \ln\left(\frac{N_A}{N_V}\right) \tag{2.30}$$

عند زيادة التطعيم في المادة شبه الموصلة فإن مستوي فرمي يتزحزح مبتعداً عن وسط الفجوة المحظورة من حزمة التوصيل في حالة المادة السالبة أو من حزمة التكافؤ في حالة المادة الموجبة كما مبين في الشكل 2.15



الشكل 2.15 طاقة مستوى فرمي كدالة لتركيز المانحات والقابلات

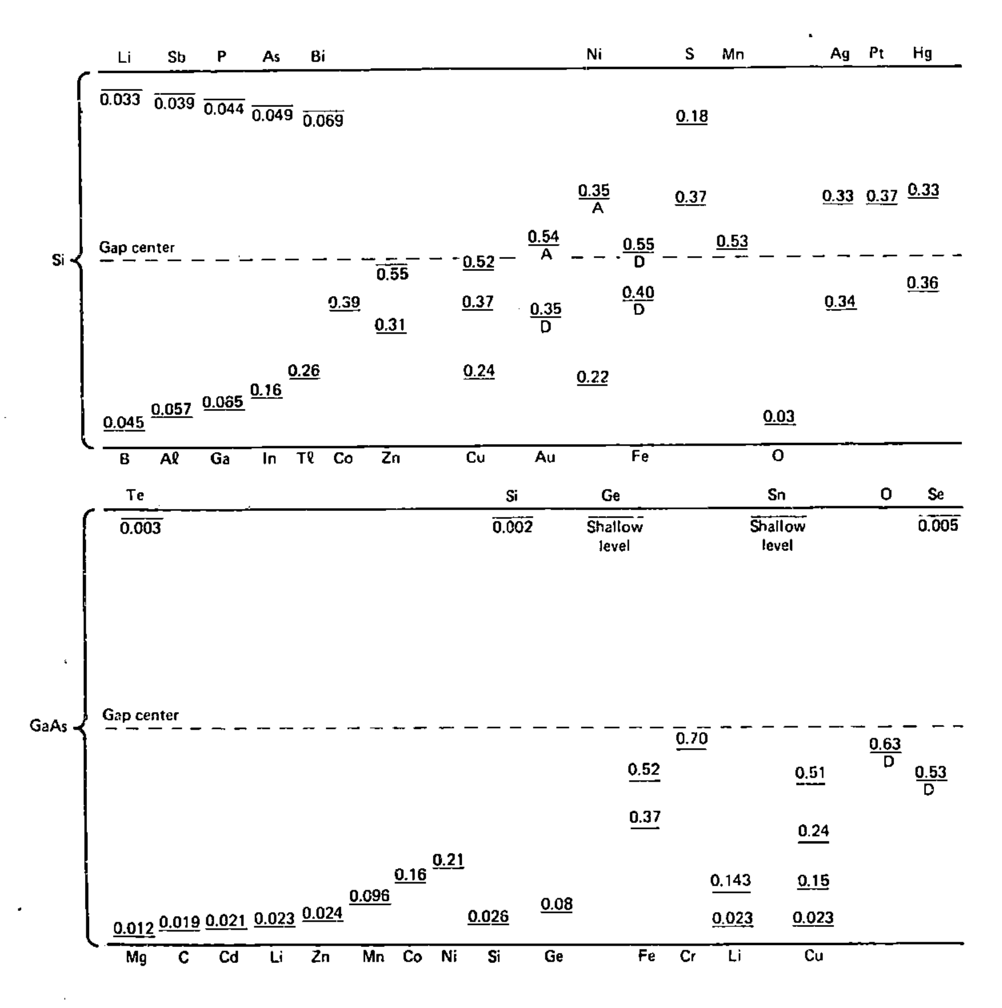
2-13 تأثير أنواع أخرى من الشوائب

Effect of Other Types of Impurities

ان فهمنا النظري لخصائص الشوائب في السليكون اقل مما هو في شوائب المجموعتين الثالثة والخامسة ، على الرغم من أن التأثيرات العملية لمثل هذه الشوائب معروفة جيداً .

تحدث هذه الشوائب مثل شوائب المجموعة الثالثة والخامسة مستويات طاقة مسموحة في الفجوة المحظورة للسليكون . وهذا موضح في الشكل 16-2 حيث يبين مستويات الطاقة المسموحة والمحدثة بواسطة مجموعة من الشوائب في السليكون وكذلك في شبه الموصل المركب GaAs وكما يبين أن بعض الشوائب تحدث مستويات طاقة متعددة (multiple energy levels) . وإن العيوب في البلورات تعمل بطريقة مشابهة وتحدث مستويات طاقة مسموحة في الفجوة المحظورة .

ان الشوائب ولاسيما الشوائب التي تحدث مستويات طاقة قريبة من وسط الفجوة المحظورة تقلل من خصائص أشباه الموصلات . ولهذا السبب تقلص تراكيز الشوائب في المواد الاولية المستخدمة في صناعة هذه النبائط الى الحد الأدنى المسموح به تقنياً وهذا الحد لايتجاوز عموماً جزءاً واحداً من الشوائب لكل بليون جزء من المادة .



الشكل 2.16 مستويات الطاقة داخل الفجوة المحظورة لمجموعة من الشوائب في السليكون و GaAs A يعنى المستوى القابل و D يعني المستوى الواهب (نقلاً عن S.M Sze و J.Irwin في مجلة Solid State Electronics العدد 11 سنة 1968 ص : 599)

2-14 انتقال حاملات الشحنة CARRIER TRANSPORT

2.14.1 الانجراف Drift

تحت تأثير المجال الكهربائي ، ξ ، ان الألكترون الحر العشوائي الحركة يكون له تعجيل $a = \xi/m$ بأتجاه معاكس للمجال وتتزايد سرعته تحت تأثير هذا المجال مع الزمن . أما الالكترون الموجود في البلورة فيكون في حالة تختلف عن ذلك اذ يتحرك بكتلة مختلفة وكما لا يستمر تعجيله لفترة طويلة ، حيث يصطدم في النهاية مع ذرة الشبيكة أو ذرة الشائبة أو خلل (defect) في التركيب البلوري ويؤدي مثل هذا التصادم الى عشوائية حركة الألكترون وكذلك تقليل السرعة العالية الناتجة عن تسليط المجال . ويعرف المعدل الزمني بين التصادمات المتتالية بزمن الاسترخاء t_r (relaxation time) ويحدد هذا الزمن بواسطة السرعة الحرارية العشوائية للألكترونات التي تكون عادة اكبر بكثير من السرعة الناتجة من تسليط المجال . إن معدل الزيادة في سرعة الألكترونات بين التصادمات بسبب المجال الكهربائي المسلط يعرف بسرعة الانجراف (drifit velocity) ويتضح هذا ، بالنسبة للألكترونات الموجودة في حزمة التوصيل في المعادلة الآتية :

$$v_d = \frac{1}{2}at = \frac{1}{2}\frac{qt_r}{m_e^*}\xi, \qquad (2.31)$$

(ولايظهر معامل 2 عندما تمثل t_r معدل الزمن لسرعة الالكترونات) . أن التحركية (mobility) للألكترونات تعرف بالنسبة التالية :

$$\mu_e = \frac{v_d}{\xi} = \frac{qt_r}{m_e^*} \qquad (2.32)$$

وان كثافة التيار الساري الناجم عن هذه الالكترونات في حزمة التوصيل هي :

$$J_e = qnv_d = q\mu_e n\xi \qquad (2.33)$$

اما بالنسبة للفجوات في حزمة التكافؤ فهي :

$$J_h = q\mu_h p\xi \qquad (2.34)$$

والتيار الكلي الساري هو حاصل جمع هاتين المعادلتين . ولذا فإن التوصلية الكهربائية σ لشبه الموصل تعرف بالشكل التالي :

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{J}{\xi} = q\mu_e n + q\mu_h p \qquad (2.35)$$

حيث أن ρ هي المقاومة النوعية

بالرغم من أن التحليل الناتج من المعادلة (2.32) مبسط جداً لكنه يعطى فكرة واضحة عن كيفية تغيير تحركية الحاملات μ_e و μ_h مع تغير كثافة الشوائب ودرجة الحرارة وشدة المجال الكهربائي المسلط .

أما بالنسبة لأشباه الموصلات النقية نسبياً ذات التركيب البلوري الخالي من العيوب تقريبا ، فأن الاصطدامات التي تسبب عشوائية السرعة لحاملات الشحنة تكون ناتجة من ذرات البلورة المضيفة وكذلك الشوائب المتأينة تعمل كمشتتات فعالة للسرعة بسبب شحناتها .

وبالنتيجة كلما كان شبه الموصل اكثر تطعيماً ، كان المعدل الزمني بين التصادمات قليلاً ومن ثم التحركية . ان العلاقات التجريبية بين تحركية حاملات الشحنة ومستوى التطعيم N بـ (cm^{-3}) في السليكون من النوع الجيد تكون بشكل التالي :

$$\mu_e = 65 + \frac{1265}{1 + (N/8.5 \times 10^{16})^{0.72}}\ \text{cm}^2/\text{V-s}$$
$$\mu_h = 47.7 + \frac{447.3}{1 + (N/6.3 \times 10^{16})^{0.76}}\ \text{cm}^2/\text{V-s} \qquad (2.36)$$

اما الشوائب غير المخصصة والعيوب البلورية فتؤدي الى تقليل التحركية لأسباب التي ذكرناها سابقاً .

يزداد اهتزاز ذرات البلورة المضيفة بزيادة درجة الحرارة وبهذا تصبح الذرات اهدافاً فعالة للتصادم وهذه العملية تقلل من المعدل الزمني بين التصادمات ومن ثم يقل تحركية الحاملات . ويقل تأثير الأهتزاز بازدياد مستوى التطعيم حيث تتحول الشوائب المتأينة الى مشتتات فعالة ويطغى تأثيرها .

إن زيادة المجال الكهربائي المسلط يؤدي الى زيادة انجراف الحاملات الى سرعة تقارب السرعة الحرارية العشوائية . ولذا فإن السرعة الكلية للالكترون تتزايد اخيراً مع شدة المجال ، مما يؤدي الى تناقص المعدل الزمني بين التصادمات وبالتالي تقل تحركية حامل الشحنة .

2-14-2 الانتشار Diffusion

تسري حاملات الشحنة في اشباه الموصلات بعملية الانتشار اضافة الى سريانها بعملية انجراف . من الظواهر الفيزياوية المعروفة أن أي زيادة في تركيز الجسيمات في وسط ما ، مثل جزيئات الغاز ، تؤدي الى إنتشارها حتى يتعادل الوسط والسبب الأساسي لهذه الظاهرة هو السرعة الحرارية العشوائية للجسيمات في هذا الوسط .

يتناسب معدل تدفق الجسيمات مع سالب انحدار التركيز (الشكل 2.17) وأن التيار يتناسب مع الجسيمات المشحونة ، فإن كثافة التيار الناتجة عن انحدار تركيز الألكترونات في بعدٍ واحد هي :

$$J_e = qD_e \frac{dn}{dx} \qquad (2.37)$$

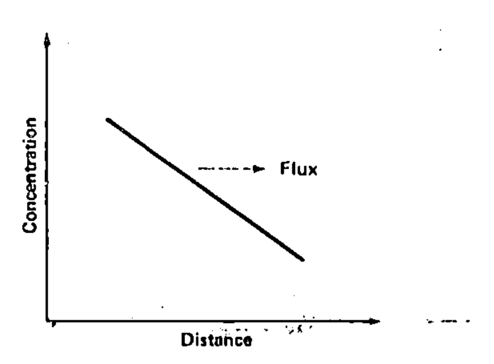
حيث D_e ثابت يعرف بثابت الانتشار (diffusion constant) وبنفس الطريقة فأن التعبير الرياضي للفجوات هي :

$$-_h = - qD_h \frac{dp}{dx} \qquad (2.38)$$

مع ملاحظة أن اختلاف الاشارة يرجع الى الشحنتين المتعاكستين الموجودتين في كل من حزمة التوصيل . وحزمة التكافؤ . وان عمليات الانجراف والانتشار مترابطة في الاساس كما ان التحركية وثوابت الانتشار مترابطة وفق علاقات اينشتاين

$$D_e = \frac{kT}{q}\mu_e \qquad \text{and} \qquad D_h = \frac{kT}{q}\mu_h \qquad (2.39)$$

حيث kT/q هو ثابت يظهر كثيراً في العلاقات الخاصة بالخلايا الشمسية وله وحدة الفولتية وقيمته تساوي 26 مليّ فولتٍ عند درجة حرارة الغرفة . وهي قيمة من المفيد تذّكرها .



الشكل 17-2 التدفق الانتشاري للحاملات بسبب انحدار التركيز

2.15 الخلاصة SUMMARY

ان أهم النقاط الرئيسة المذكورة في هذا الفصل هي أن اشباه الموصلات لها تراكيب الكترونية تتكون من حزمة من المراتب المسموحة (حزمة التكافؤ) وتكون مشغولة تماماً بالألكترونات ، ومنفصلة بواسطة فجوة محظورة عن حزمة أخرى فوقها للمراتب المسموحة (حزمة التوصيل) والتي تكون فارغة اساساً من الألكترونات . ويحدث جريان التيار في أشباه الموصلات من حركة الألكترونات في حزمة التوصيل وحركة الفجوات في حزمة التكافؤ وفي كثير من الحالات تستطيع الألكترونات في حزمة التوصيل والفجوات في حزمة التكافؤ أن تتصرف كجسيمات حرة ، شريطة أن تستخدم الكتلة الفعّالة بسبب تاثير القوى الدورية للذرات الموجودة في البلورة المضيفة . أن أغلب الألكترونات الموجودة في حزمة التوصيل تكون لها طاقة قريبة من طاقة حافة حزمة التوصيل ، بينما اغلب الفجوات تكون بطاقة قريبة من طاقة حافة حزمة التكافؤ .

تنقسم أشباه الموصلات الى أشباه الموصلات ذات الفجوة المحظورة المباشرة "وغير المباشرة" . والتي تعتمد على شكل العلاقة بين طاقة الألكترونات في حزمة التوصيل وزخمها البلوري .

اما الشوائب الخاصة بالتطعيم فعند إضافتها الى أشباه الموصلات تستطيع السيطرة على التركيز النسبي للألكترونات في حزمة التوصيل لشبه الموصل وكذلك الفجوات في حزمة التكافؤ . وأما الحاملات في هاتين الحزمتين فتتحرك بواسطة عمليتين الانجراف والانتشار عند وجود العوامل المثيرة .

وفي الفصل الثالث نحاول وصف العمليات الألكترونية الأخرى التي تحدث في أشباه الموصلات عند إثارتها بالضوء . من الآليات الأساسية التي تم مناقشتها في هذا الفصل والتي تناقش في الفصل الآتي يمكن تركيب مجموعة موحدة من المعادلات وتستخدم هذه المجموعة من المعادلات في الفصول الأخيرة لوضع المباديء الاساسية لتصميم الخلية الشمسية .

تمارين

2.1 . بين بالرسم على مخطط وحدة الخلية المكعبة (cubic unit cell) المستويات البلورية التالية (a)-(001) و(b) (010) و (c)-(011) و (d)-(111) .

2.2- (a) إن أداء الخلية الشمسية السليكونية يتحسن بتخديش السطح كيمياوياً وذلك لتقليل الهدر في الضوء بالأنعكاس ويبين الشكل 6.7 سطح بلورة سليكونية متوازياً مع المستوي (001) ، حيث تم معالجته بمحلول كيميائي لتتآكل بمعدلات متفاوتة وفي مختلف الأتجاهات في البلورة لتحدث مواشير مربعة القاعدة كما مبين في الشكل . اذا علمت أن أوجه الموشور هي مجموعة متكافئة من المستويات [111] . أوجد الزاوية بين الوجهين المتعاكسين للمواشير .

(b)- اذا علمت أن جزء R من الضوء الساقط ينعكس على سطح السليكون الأصلي . بأهمال الاعتماد على زاوية السقوط وطول الموجة ، بين إن الجزء المنعكس من الضوء الساقط يصبح اقل من R^2 بعد تخديش السطح .

2.3 احدى الطرق المتبعة لأضافة الشوائب الى السليكون وبكميات محددة هي التقنية المعروفة بالغرس الأيوني (ion implantation) . حيث تجعل من الأيونات المراد زرعها ذات سرعة عالية توجه الى سطح السليكون فاذا إصطدمت الأيونات على الأتجاهات البلورية الموضحة في الشكل (2.3 b,c,d) . ففي أي إتجاه تتوقع أن تنغرس الأيونات الى عمق اكثر في السليكون .

2.4- هناك مرتبة طاقة مسموحة للألكترون في شبه الموصل تقع فوق مستوى فرمي بـ 0.4 الكترون فولت ماهي إحتمالية انشغال هذه الحالة بالالكترون في حالة التوازن الحراري . وعند درجة 300 كلفن ؟

2-5- اذا فرضنا ان الكتلة الفعالة للألكترون والفجوة تساوي كتلة الألكترون الحر . إحسب كثافة المراتب الفعالة في كل من حزمة التوصيل والتكافؤ للسليكون ، عند درجة 300 كلفن . وبفرض أن طاقة الفجوة المحظورة

تساوي 1.1 الكترون فولت ، أوجد التركيز الذاتي n_i للسليكون عند درجة الحرارة نفسها .

2.6 - (a)- تم تطعيم شرحية سليكونية بشكل منتظم بنسبة 10^{22}ذرة فسفور لمتر مكعب اذا فرضنا تأين جميع الشوائب المانحة . فما تركيز كل من الالكترونات الفجوات من هذه المادة عند حالة التوازن الحراري

(b)-وإذا علم ان المراتب الناتجة من إضافة الفسفور تقع عند 0.045 الكترون فولت تحت حافة حزمة التوصيل . احسب إحتمالية إنشغال هذا المراتب بالألكترون . ثم قارنه مع حالة افتراض تأين جميع الذرات (إستعمل $N_C = 3 \times 10^{25}\ m^{-3}$, $N_V = 10^{25}\ m^{-3}$ $n_i = 1.5 \times 10^{16}\ m^{-3}$.)

2.7 - باستخدام المعادلة (2.36) لتحركية الألكترون والفجوة في السليكون ، احسب المقاومية (resistivity) لنموذج السليكون المذكور في السؤال 2.6

2.8 - أوجد المعدل الزمني للتصادمات الذرية في البلورة المضيفة للألكترونات الموجودة في حزمة التوصيل للسليكون المطعم بنسبة قليلة من الشوائب .

2.9 - تسلط مجال كهربائي 10^4 فولت / متر على نموذج من السليكون عند 300 درجة مطلقة ومطعم بنسبة 10^{22} ذرة/ م$^{-٣}$. إذا علمنا أن السرعة الحرارية هي 10^5 متر/ ثانية قارن بين سرعة الانجراف والسرعة الحرارية للألكترونات الموجودة في حزمة التوصيل . وعند أي قيمة للمجال الكهربائي تكون السرعتان متقاربتين؟

2.10 - شدة المجال الكهربائي في عينة من السليكون عند درجة 300 كلفن هي صفر وكثافة الألكترونات في حزمة التوصيل تتغير من $10^{22} / m^2$ الى $10^{21} / m^2$ على مسافة 1 مايكرون . على فرض التغير الخطي لكثافة الالكترونات ،احسب كثافة التيار المناظر لهذا التغير .

REFERENCES المراجع

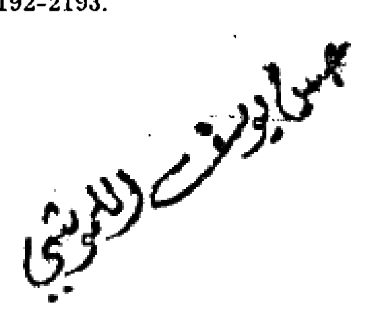
[2.1] V. AZAROFF AND J. J. BROPHY, *Elect. onic Processes in Materials* (New York: McGraw-Hill, 1963).

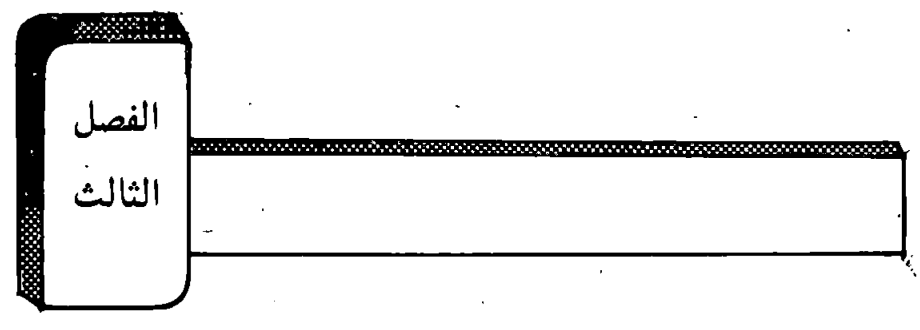
[2.2] A. VAN DER ZIEL, *Solid State Physical Electronics*, 3rd ed. (Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1976).

[2.3] S. WANG, *Solid-State Electronics* (New York: McGraw-Hill, 1966).

[2.4] W. SHOCKLEY, *Electrons and Holes in Semiconductors* (New York: Van Nostrand Rheinhold, 1950).

[2.5] D. M. CAUGHEY AND R. E. THOMAS, "Carrier Mobilities in Silicon Empirically Related to Doping and Field," *Proceedings of the IEEE* 55 (1967), 2192-2193.





التوليد واعادة الاتحاد والمعادلات الاساسية في فيزياء النبائط

GENERATION, RECOMBINATION, AND THE BASIC EQUATIONS OF DEVICE PHYSICS

3-1 المقدمة INTRODUCTION

في الفصل الاول والثاني القينا نظرة على خواص ضوء الشمس واشباه الموصلات اما في هذا الفصل سنبين عملية التفاعل بين ضوء الشمس واشباه الموصلات اللذين يعتبران عنصرين اساسين في المنظومات الفوتوفولطائية .

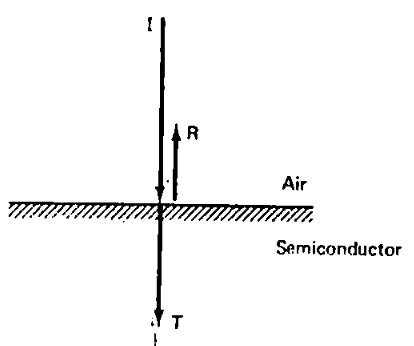
وهذا التفاعل يقودنا الى معرفة مفاهيم التوليد (generation) وأعادة الأتحاد (recombination) لحاملات الشحنات الاضافية في شبه الموصل ووصف الالية الفيزيائية الخاصة بها . واخيراً يتم الربط بين دراسة عملية التفاعل وخصائص شبه الموصل للحصول على مجموعة من المعادلات الاساسية لوصف السلوك المثالي لمعظم نبائط اشباه الموصلات ومنها الخلايا الشمسية .

3-2 تفاعل الضوء مع شبه الموصل

INTERACTION OF LIGHT WITH SEMICONDUCTOR

يبين الشكل (3-1) سقوط اشعاع من ضوء احادي اللون عمودياً على مقطع من سطح شبه الموصل فينعكس جزء من هذا الشعاع (R) وينفذ الجزء المتبقي (T) في شبه الموصل .

ان شعاع الضوء النافذ يمتص في داخل البلورة وذلك لأن طاقته كافية لاثارة الالكترونات وتحويلها من مراتب الطاقة الواطئة المشغولة الى مراتب الطاقة العالية غير المشغولة . وبما ان هناك عدداً كبيراً من المراتب المشغولة بالألكترونات في حزمة التكافؤ وعدداً كبيراً ايضاً من المراتب الفارغة في حزمة التوصيل يفصلها عن بعضها الفجوة المحظورة . فان احتمالية الامتصاص تكون كبير جداً عندما تكون طاقة فوتونات الضوء الساقط اكبر من طاقة الفجوة المحظورة، E_g لشبه الموصل .



الشكل (3-1) سقوط ضوء احادي التردد على شبه الموصل

ان المادة الماصة للضوء عادة تملك معامل انعكاسية مركبة $\hat{n}_c$ ويكتب بالشكل التالي :

$$\hat{n}_c = \hat{n} - i\hat{k}$$

حيث $\hat{k}$ تعرف بمعامل الخمود (Extinction Coefficient) . وأن حدي هذا العدد المركب للسليكون موضح في الشكل (3.2) كدالة للطول الموجي للضوء الساقط .

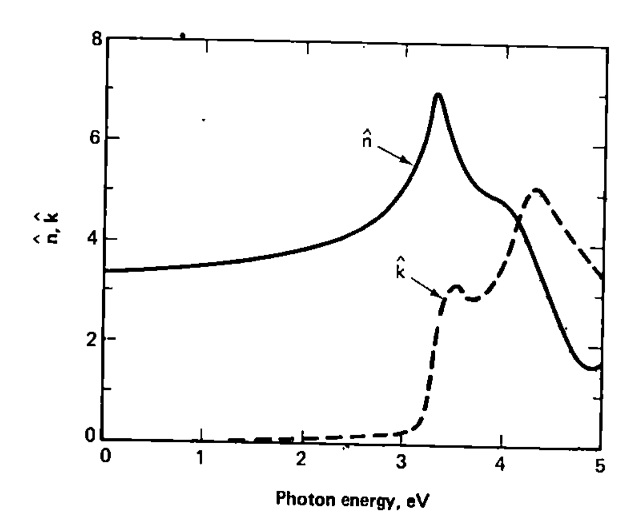
وان الجزء المنعكس للشعاع العمودي الساقط يساوي (المرجع 3.2,3.1)

$$R = \frac{(\hat{n} - 1)^2 + \hat{k}^2}{(\hat{n} + 1)^2 + \hat{k}^2} \qquad (3.1)$$

بالتعويض عن القيمة المناسبة لـ $\hat{k}$ ، $\hat{n}$ للسليكون يتبين ان ضمن الاطوال الموجية ذات العلاقة بالخلايا الشمسية ، اكثر من 30% من الضوء الساقط ينعكس ويستخدم طلاء غير عاكس (anti reflection coating) وتقنيات اخرى (لاحظ تمرين 2.2) في صناعة الخلايا الشمسية لحصر نسبة الانعكاس الى اقل مايمكن .

اما الاشعاع النافذ فيتوهن عند مروره خلال شبه الموصل ، وان نسبة امتصاص الضوء الداخل يتناسب طردياً مع شدة الضوء الساقط (تدفق الفوتونات) عند طول موجي معين . وان هذه الظاهرة الفيزياوية شائعة الحدوث وتؤدي الى اضمحلال في شدة الضوء احادي اللون أسياً عند مروره خلال شبه الموصل . ويعبر عنها رياضياً كما يلي :

$$\mathcal{I}(x) = \mathcal{I}(x_0)e^{-\alpha(x - x_0)} \qquad (3.2)$$



الشكل (2-3) الجزء الحقيقي والخيالي (سالب) لمعامل الانكسار السليكون [من مرجع 38-37 (1980)
[H.R Phillip and E.A Taft, Physical Review, 120

حيث ان α هي دالة للطول الموجي الساقط وتعرف بمعامل الامتصاص (absorption coefficient) . هذا المعامل مهم جداً عند تصميم الخلية الشمسية وذلك لانه يعطي مدى امتصاص الخلية الشمسية للضوء الساقط عند طول موجي معين .

هناك علاقة بين معامل الامتصاص α ومعامل الخمود $\hat{k}$. واذا اخذنا ضوء بموجة مستوية ذات تردد f في اتجاه x وبسرعة v فيمكن التعبير عن شدة المجال الكهربائي المرافق لهذه الموجة بالمعادلة :

$$\xi = \xi_0 \exp\left[i2\pi f\left(t - \left(\frac{x}{v}\right)\right)\right] \qquad (3.3)$$

وبما ان العلاقة بين سرعة الضوء في شبه الموصل وسرعته في الفراغ هي :

$$v = \frac{c}{\hat{n}_c} \qquad (3.4)$$

لذا

$$\frac{1}{v} = \frac{\hat{n}}{c} - \frac{i\hat{k}}{c} \qquad (3.5)$$

وبتعويض هذه النتيجة في معادلة (3-3) نحصل على

$$\xi = \xi_0 \exp(i2\pi ft)\exp\left(-\frac{i2\pi x\hat{n}}{c}\right)\exp\left(-\frac{2\pi f\hat{k}x}{c}\right) \qquad (3.6)$$

وان الحد الاخير من المعادلة (6-3) يعرف بعامل التوهين (attenuation factor) . حيث تتوهن القدرة بدلالة شدة المجال الكهربائي . وبمقارنة المعادلة (3.2) و (3.6) يمكن الحصول على

$$\alpha = \frac{4\pi f\hat{k}}{c} \qquad (3.7)$$

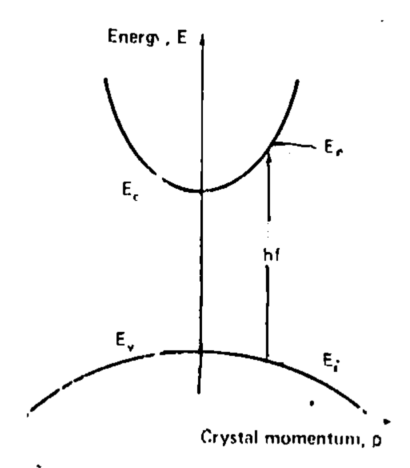
3-3 امتصاص الضوء ABSORPTION OF LIGHT

3-3-1 شبه الموصل ذو الفجوة المباشرة

Direct-Band-Gap Semiconductor

ان عملية الامتصاص في الحقيقة هي ازالة أو امتصاص الفوتونات وذلك بأثارة الكترون ما من حزمة التكافؤ ليصبح في حزمة التوصيل تاركاً وراءه فجوة في حزمة التكافؤ . وان كل من طاقة وزخم الفوتون تبقى ثابتاً هذا الانتقال ويملك الفوتون عادة طاقة كبيرة نسبياً (hf) وزخما صغير(h/λ).

ان شكل عملية الامتصاص لشبه الموصل ذي الفجوة المباشرة بواسطة مخطط الطاقة ـ زخم مبين في الشكل 3.3 . وبما ان زخم الفوتون صغير مقارنة بزخم البلورة فان قيمة الزخم تكاد ان تبقى ثابتة وان الفرق بين الطاقة الابتدائية والنهائية عند عملية الانتقال تساوي طاقة الفوتون الاصلية



الشكل (3-3) تخطيط علاقة الطاقة ـ زخم البلورة شبه الموصل ذي الفجوة المباشرة بين عملية امتصاص الفوتون باثارة الالكترون في حزمة التوصيل الى حزمة التكافؤ .

$$E_f - E_i = hf \qquad (3.8)$$

وبأخذ حزم الطاقة على شكل القطع الناقص (Parabolic bands) التي مر ذكرها في الفصل الثاني تصبح معادلة (3-8) كما يلي :

$$\begin{aligned} E_f - E_c &= \frac{p^2}{2m_e^*} \\ E_i - E_v &= \frac{p^2}{2m_h^*} \end{aligned} \qquad (3.9)$$

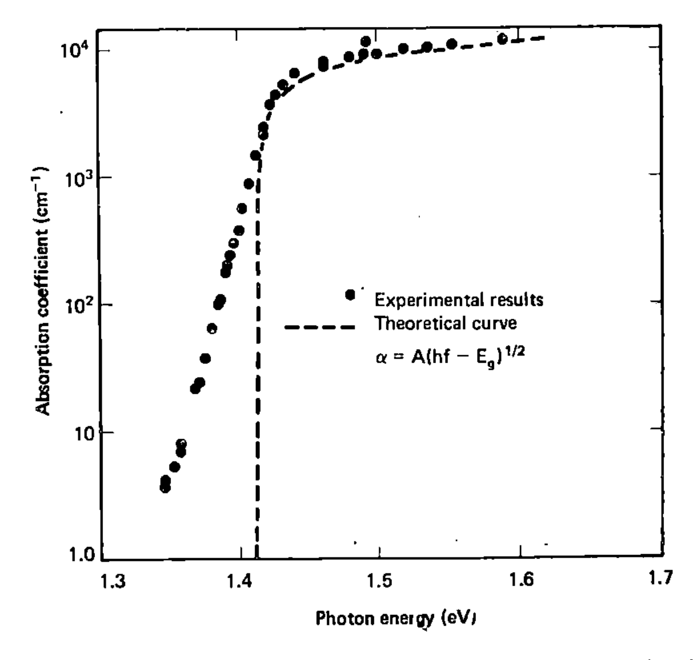
ولذا فان القيمة النوعية (specific value) للزخم البلوري الذي تقع عنده عملية الانتقال تتضح بالعلاقة التالية :

$$hf - E_g - \frac{p^2}{2}\left(\frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*}\right) \qquad (3.10)$$

فكلما تزداد طاقة الفوتون hf فأن قيمة الزخم البلوري الذي تقع عنده عملية الانتقال ، يزداد ايضاً كما موضح في الشكل (3-3) وكذلك تزداد الطاقة للمراتب الابتدائية والنهائية كلما ابتعدنا عن حافة الحزمة . فان احتمالية الامتصاص تعتمد على كثافة الالكترونات في حزمة التوصيل وكذلك على المراتب غير المشغولة في حزمة التوصيل . وبما ان كثافة المراتب تتزايد كلما ابتعدنا عن حافة الحزمتين فأنه ليس من الغريب ان يتزايد معامل الامتصاصية فجأة عندما تصبح طاقة الفوتون اكبر من E_g وفق المعادلة التالية :

$$\alpha(hf) \approx A^*(hf - E_g)^{1/2} \qquad (3.11)$$

حيث A^* ثابت ويساوي 2×10^4 عندما تكون α بوحدات cm^{-1} و hf و E_g بوحدات (eV) عند المقارنة بين هذه العلاقة النظرية ونتائج التجربة لشبه موصل ذي الفجوة المباشرة مثل GaAs نلاحظ هناك تطابقاً مقبولا وخاصة عند القيم العالية لمعامل الامتصاص وكما مبين في الشكل (4-3)



الشكل (4-3) معامل الامتصاص لـ GaAs كدالة لطاقة الفوتونات

(After Tis Moss and T.D.F Howkins Infrared Physics 1, 1961, 111

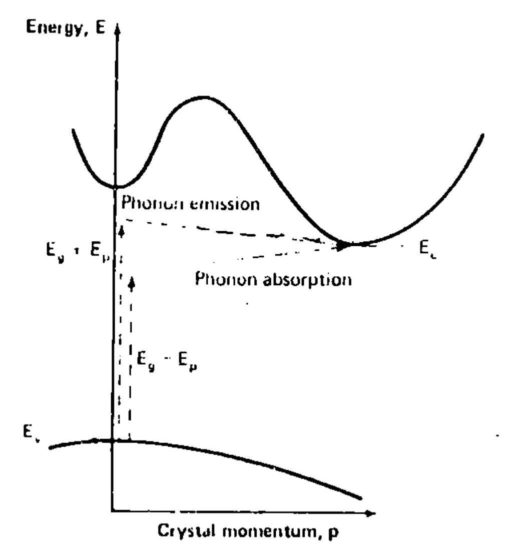
وبما ان شدة الضوء الساقط تنخفض الى $1/e$ من قيمتها عندما يقطع مسافة $1/\alpha$ في شبه الموصل . فأن المعادلة (3-11) تبين ان طاقة الفوتون لضوء الشمس التي تكون اكبر من E_g تمتص عند اول بضع مايكرونات من دخوله شبه الموصل ذي الفجوة المباشرة .

3-3-2 شبه الموصل ذو الفجوة غير المباشرة

Indirect-Band-Gap Semiconductor

في حـــالــة شبــه الموصــل ذي الفجــوة غيــر المبــاشــرة (indirect band gap semiconductors) فان اوطأ نقطة من الطاقة من حزمة التوصيل واعلى نقطة من حزمة التكافؤ تقعان عند قيم مختلفة للزخم البلوري كما في الشكل (3-5) .

وعليه فان الفوتونات التي تكون طاقتها اكبر من E'_g تؤدي الى الانتقال المباشر للألكترونات من حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل كما تم وصفها في الفقرة 3.3.1



الشكل (3-5) رسم الطاقة والزخم البلوري لشبه الموصل ذي الفجوة غير المباشرة حيث يبين امتصاص الفوتون على مرحلتين ويتضمن انبعاث أو امتصاص الفونون .

اما الفوتونات التي تملك طاقات اوطأ من E_g فتسبب الانتقال بعملية ذات مرحلتين لاتشارك فيها الفوتونات والالكترونات فحسب بل فيها جسيم ثالث يعرف بالفونون (*phonon*) . ويمكن التعبير عن اهتزازات الشبيكة للبلورة بدلالة

الخاصية الموجية أو الجسيمية كما هو الحال في الضوء فالفونون ماهو الا جسيم كمي يشير الى اهتزازات الشبيكة . ومن المعروف ان الفونونات بعكس الفوتونات تملك طاقة واطئة وزخماً عالياً نسبياً .

ويمكن تفسير هذا الاختلاف بملاحظة العلاقة بين الفونونات والصوت الذي ينقل خلال المادة الصلبة بواسطة الاهتزازات الذرية . ويرجع الاختلاف الكبير بين سرعة الضوء وسرعة الصوت في المادة الصلبة الى فرق نسبة الطاقة والزخم والفوتون .

ويبن الشكل 5-3 مخطط الطاقة وخم حيث يستطيع الالكترون الانتقال من اعلى طاقة في حزمة التكافؤ الى اوطأ طاقة في حزمة التوصيل بامتصاص فوتونات ذات طاقة مناسبة وانبعاث أو امتصاص الفوتون بالزخم المطلوب . ولذا فأن اقل طاقة للفوتونات اللازمة لانتقال الالكترون من حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل هي :

$$hf = E_g - E_p \qquad (3.12)$$

حيث ان E_p هو طاقة الفوتون الممتص عند الزخم المطلوب .

وبما ان عملية امتصاص الضوء في شبه موصل ذي فجوة غير مباشرة تتطلب وجود جسيم اضافي فان احتمالية امتصاص الضوء من قبل شبه موصل ذي الفجوة غير المباشرة تكون اقل بكثير مما هي في شبه موصل ذي الفجوة المباشرة . لذا فان معامل الامتصاص لهذه المادة يكون اقل من ذي الفجوة المباشرة ويقطع الضوء مسافة غير قليلة في هذه المادة قبل ان يتم امتصاصه . وان تحليل القيم النظرية لمعامل الامتصاص يعطي النتائج الاتية

$$\alpha_a(hf) = \frac{A(hf - E_g + E_p)^2}{\exp(E_p/kT) - 1} \qquad (3.13)$$

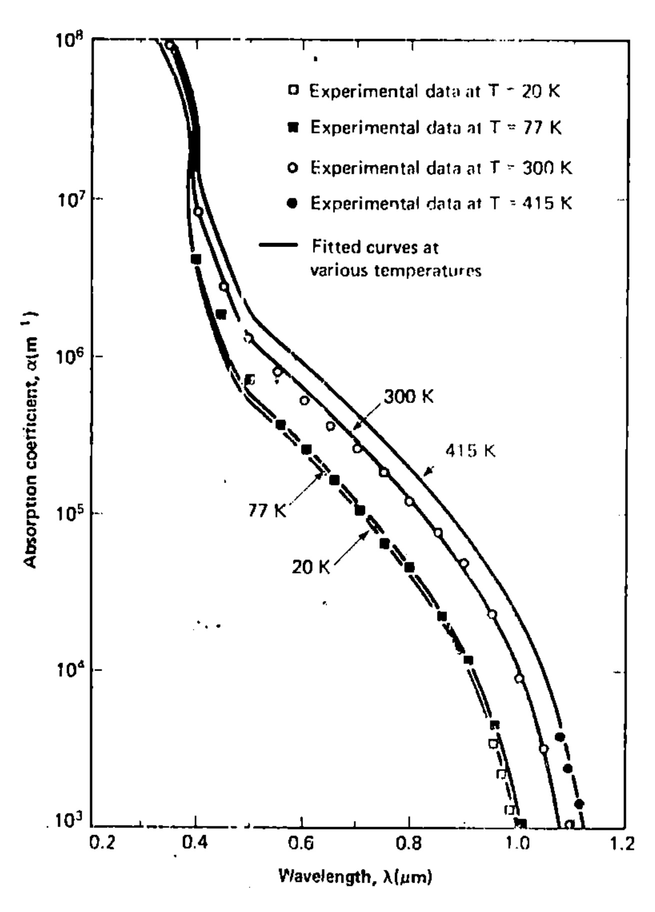
بالنسبة للانتقال الذي يشمل امتصاص الفونون اما بالنسبة للانتقال الذي يشمل انبعاث الفونون فإن

$$\alpha_e(hf) = \frac{A(hf - E_g - E_p)^2}{1 - \exp(-E_p/kT)} \qquad (3.14)$$

وبما ان انبعاث أو امتصاص الفونون يكون ممكناً عندما $E_g + E_p < hf$ فان معامل الامتصاص في هذه الحالة يكون

$$\alpha(hf) = \alpha_a(hf) + \alpha_e(hf) \qquad (3.15)$$

يبين الشكل 6-3 معامل الامتصاص للسليكون كدالة للطول الموجي للضوء الساقط عند درجات حرارة مختلفة . ان منطقة الامتصاص الضعيفة عند اطوال موجية اكبر من 0.5 مايكرون تشير الى عمليات الامتصاص لفجوة غير المباشرة . اما عند اطوال موجية اقل من 0.4 مايكرون فإن معامل الامتصاص يزداد فجأة



الشكل (6-3) معامل الامتصاص للسليكون كدالة للطول الموجي للضوء عند درجات حرارة مختلفة (من مرجع 3-3) .

ويمكن ان ينسب هذا الى عمليات الامتصاص للفجوة المباشرة . ويمكن استخدام علاقة تجريبية شاملة تتضمن المعادلات (3.11) و (3.12) و (3.13) و (3.14) لتفسير النتائج العملية بدرجة كبيرة من الدقة للفوتونات وبطاقات من 1.1 الى 4 الكترون فولت ودرجات حرارة من 20 الى 500 كلفن وتكون هذه العلاقة بالصيغة الرياضية الآتية :

(مرجع 3.3) .

$$\alpha(hf, T) = \sum_{\substack{i=1,2 \\ j=1,2}} A_{ij} \left\{ \frac{[hf - E_{gj}(T) + E_{pi}]^2}{\exp(E_{pi}/kT) - 1} + \frac{[hf - E_{gj}(T) - E_{pi}]^2}{1 - \exp(-E_{pi}/kT)} \right\} + A_d\,[hf - E_{gd}(T)]^{1/2} \qquad (3.16)$$

ان قيم الثوابت A_{ij} و E_{gj} و E_{pi} مدونة في الجدول (3.1) .

جدول 3.1 قيم الثوابت للعلاقة التجريبية الخاصة بمعامل الامتصاص للسليكون (si)

Quantity	*Numerical value*
$E_{g1}(0)^*$	1.1557 eV
$E_{g2}(0)^*$	2.5 eV
$E_{gd}(0)^*$	3.2 eV
E_{p1}	1.827×10^{-2} eV
E_{p2}	5.773×10^{-2} eV
A_{11}	1.777×10^3 cm^{-1}/eV^2
A_{12}	3.980×10^4 cm^{-1}/eV^2
A_{21}	1.292×10^3 cm^{-1}/eV^2
A_{22}	2.895×10^4 cm^{-1}/eV^2
A_d	1.052×10^6 cm^{-1}/eV$^{1/2}$

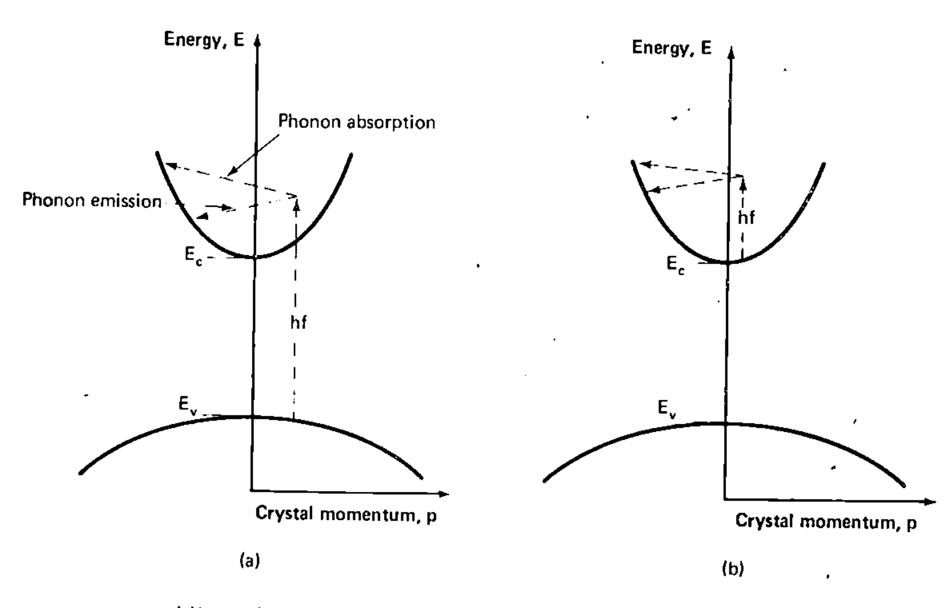
$^*E_g(T) = E_g(0) - [\beta T^2/(T + \gamma)]$ with $\beta = 7.021 \times 10^{-4}$ eV/K and $\gamma =$ 1108 .K

من مرجع 3.3

3.3.(3̄) عمليات الامتصاص الاخرى Other Absorption Processes

إن امتصاص الضوء في شبه الموصل لايكون الا في عمليات الامتصاص التي مر ذكرها وتم التأشير بان الامتصاص يحدث عند طاقة عالية وكافية لانتقال الألكترون عبر الفجوة المحظورة المباشرة لشبه الموصل ذي الفجوة غير المباشرة مثل

السليكون . وبطريقة مشابهة يمكن امتصاص الضوء على مرحلتين يشمل انبعاث أو امتصاص فونونات في شبه الموصل ذي الفجوة المباشرة كما في الشكل (3.7a) . ويحدث هذا مصاحباً لعملية الامتصاص المباشر الاشد تأثراً التي مر ذكرها في الفقرة (3.3.1) .



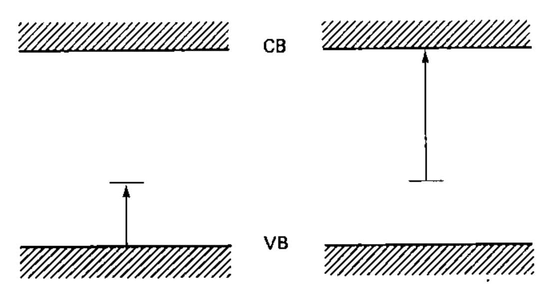
الشكل (3.7) a- مرحلة عملية الامتصاص للفوتون في شبه موصل ذات الفجوة المباشرة .
b- امتصاص بواسطة حاملات الحرة (free carriers) في حزمة التوصيل بدون توليد زوج الكترون فجوة .

وبطريقة مشابهة يمكن إثارة حاملات الشحنة الى طاقات اعلى في الحزم الموجودة فيها بامتصاص الفوتون مع إنبعاث او امتصاص فونون كما موضح في الشكل (3.7b) ومع أن هذه العملية ضعيفة نسبياً غير ان اهميتها تزداد عند الموجات الطويلة وعندما يكون تركيز الحاملات عالياً . بالرغم من أن هذه العملية غير مهمة في عمل الخلية الشمسية ولكنها توضح الحالة التي يحدث فيها الامتصاص بدون توليد ثنائي الكترون ـ فجوة .

ويمكن امتصاص الضوء ايضاً بواسطة الأثارة والانتقال بين مراتب الطاقة الموجودة ضمن الفجوة المحظورة بسبب اضافة الشوائب كما موضح في الشكل(3.8)

أخير نوضح باختصار عمليتين اخريين واللتين تسببان تأثيرات ثانوية في الخلايا الشمسية وهما أولاً ظاهرة فرانز ـ كلديش (Franz-keldysh effect) (مرجع

3.2) والتي تحدث في بعض مناطق الخلايا الشمسية نتيجة تاثير المجال الكهربائي الشديد . وتسبب هذه الظاهرة انحراف حافة الامتصاص (absorption edge) نحو الطاقات الواطئة الذي يؤدي الى تقليل عرض الفجوة المحظورة . اما التأثير الثاني فمن زيادة تركيز الشوائب التي توثر ايضاً على إنحراف حافة الامتصاص حيث تعمل على تقليل عرض الفجوة المحظورة أيضاً .



الشكل (3.8) امتصاص الضوء بواسطة اثارة الحاملات بين الحزمتين ومستويات الطاقة ضمن الفجوة المحظورة .

3.4 عمليات اعادة الاتحاد RECOMBINATION PROCESSES

3.4.1 الاسترخاء الى حالة التوازن Relaxation to Equilibrium

عند سقوط ضوء ذي طول موجي مناسب على شبه موصل يسبب توليد ازواج من الكترون فجوة وبذلك يؤدي الى زيادة في
تركيز حالاملات الشحنة عما كان عليه في الظلام . فاذا قطع الضوء فان هذه الزيادة في التركيز تعود تدريجياً الى قيمها الأولية المتوازنة . ان عملية الاضمحلال هذه تعرف بعملية اعادة الاتحاد (recombination) وهناك ثلاث آليات (mechanism) مختلفة لعملية اعادة الاتحاد تحدث جميعها بصورة متوازية ، أي أن معدل عملية الاتحاد يساوي مجموع الأليات الثلاث ونوضح فيما ياتي هذه الآليات الثلاثة بشيء من التفصيل :

3.4.2 اعادة الاتحاد الأشعاعي Radiative Recombinuation

تعتبر اعادة الاتحاد الاشعاعي عملية معاكسة لعملية الامتصاص الموضحة في الفقرة 3.3 . فان الألكترون الذي يحتل مرتبة بطاقة اعلى من مرتبته عندما يكون في حالة التوازن الحراري وينتقل الى مرتبة بطاقة الاوطأ غير المشغولة مع انبعاث

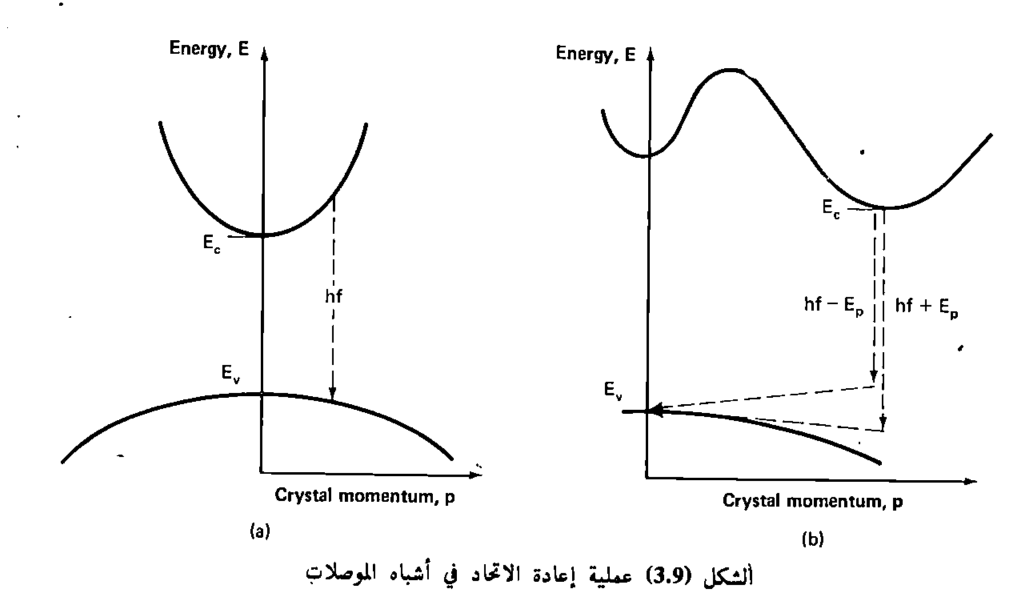
كل أو معظم فرق الطاقة بين المرتبتين على شكل ضوء . وهناك عملية اعادة الاتحاد الاشعاعي المعاكسة لكل عمليات الامتصاص كما في الشكل (3.9) . وتحدث اعادة الاتحاد الاشعاعي عادة في شبه موصل ذي فجوة مباشرة اسرع بكثير من حدوثها في شبه موصل ذي فجوة غير مباشرة وذلك لأن الاخير يحتاج الى عملية الانتقال على مرحلتين وباشتراك الفونون .

ويتناسب معدل اعادة اتحاد الاشعاع الكلي طردياً مع حاصيل ضرب المراتب المشغولة (الالكترونات) في حزمة التوصيل وتركيز المراتب غير المشغولة (الفجوات) في حزمة التكافؤ أي أن : .

$$R_R = Bnp \qquad (3.17)$$

حيث B ثابت خاص لشبه الموصل ويمكن حساب قيمة B عادة من معامل امتصاص شبه الموصل وذلك لوجود علاقة بين الامتصاص البصري وعملية اعادة الاتحاد .

وفي حالة التوازن الحراري أي عندما يكون $np = n_i^2$ يكون معدل اعادة الاتحاد في حالة توازن مع معدل التوليد . وعند حدوث توليد الحاملات بفعل حافز



الشكل (3.9) عملية إعادة الاتحاد في أشباه الموصلات
(a) الفجوة المباشرة
(b) الفجوة غير المباشرة

خارجي فان محصلة معدل اعادة الأتحاد تتمثل بالمعادلة (3-17) حيث U_R هو الفرق بين معدل اعادة الاتحاد الكلي ومعدل التوليد عند التوازن الحراري :

$$U_R = B(np - n_i^2) \qquad (3.18)$$

من الممكن تحديد ديمومة الألكترونات والفجوات τ_e و τ_h في أي آلية من آليات اعادة الاتحاد بالمعادلات الاتية

$$\tau_e = \frac{\Delta n}{U}$$
$$\tau_h = \frac{\Delta p}{U} \qquad (3.19)$$

حيث U معدل اعادة الاتحاد و Δn و Δp هي فرق اختلاف تركيز قيمتها المتوازنة n_0 و p_0

عندما يكون $\Delta n = \Delta p$ ، في آلية اعادة الاتحاد الاشعاعي ، يمكن حساب الديمومة المميزة(characteristic life time) (3.18) المرجع (3.2) من المعادلة :

$$\tau = \frac{n_0 p_0}{B n_i^2 (n_0 + p_0)} \qquad (3.20)$$

وبالنسبة للسليكون فان قيمة B تساوي $10^{-15} \times 2$ سم^3/ ثانية تقريباً . (المرجع 3.2)

وكما هو متوقع تكون عملية اعادة الاتحاد الاشعاعي في شبه الموصل ذي الفجوة المباشرة أصغر بكثير من شبه الموصل ذي الفجوة غير المباشرة . وتشكل هذه العملية القاعدة الرئيسة لعمل ليزرات شبه الموصلة التجارية وثنائيات الباعثة للضوء باستخدام GaAs وسبائكه المختلفة . اما في حالة السليكون فإن عمليات الاتحاد الاخرى لها اهمية اكبر .

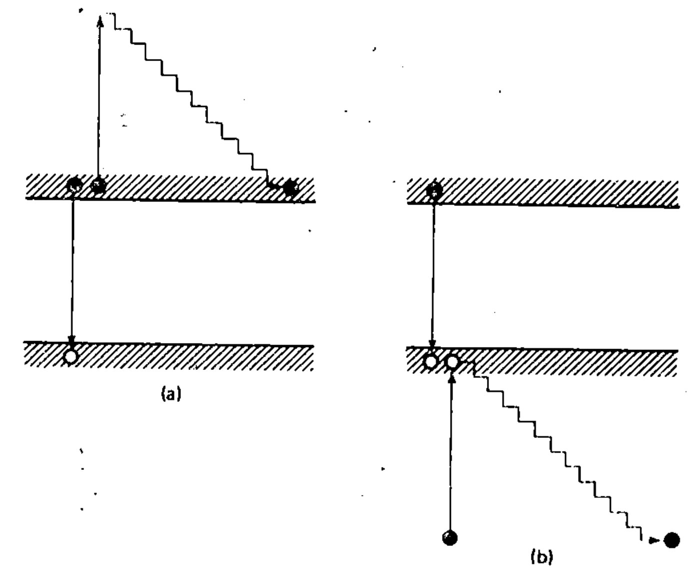
3.4.3 اعادة اتحاد اوشي Auger Recombination

في تأثير اوشي (Auger effect) يتحد الالكترون مع الفجوة ويعطي الطاقة الزائدة الى الكترون ثان (اما في حزمة التوصيل او في حزمة التكافؤ) بدلاً من ان يبعث الضوء . الشكل (3.10) يوضح هذه العملية ثم يسترخي (relax) الالكترون الثاني هذا ليرجع الى طاقته الاولية بانبعاث الفوتونات وان عملية اعادة اتحاد اوشي هي عملية معاكسة لتأثير التأين التصادمي (impact ionization effect) المألوف والناتج عن كسر اصرة وتوليد زوج الكترون ـ فجوة نتيجة تصادم الكترون ذي طاقة عالية مع ذرة . ولديمومة المميزة τ ذات العلاقة بعملية اعادة اتحاد اوشي (المرجع (3.2)) هي :

$$\frac{1}{\tau} = Cnp + Dn^2$$

أو (3.21)

$$\frac{1}{\tau} = Cnp + Dp^2$$



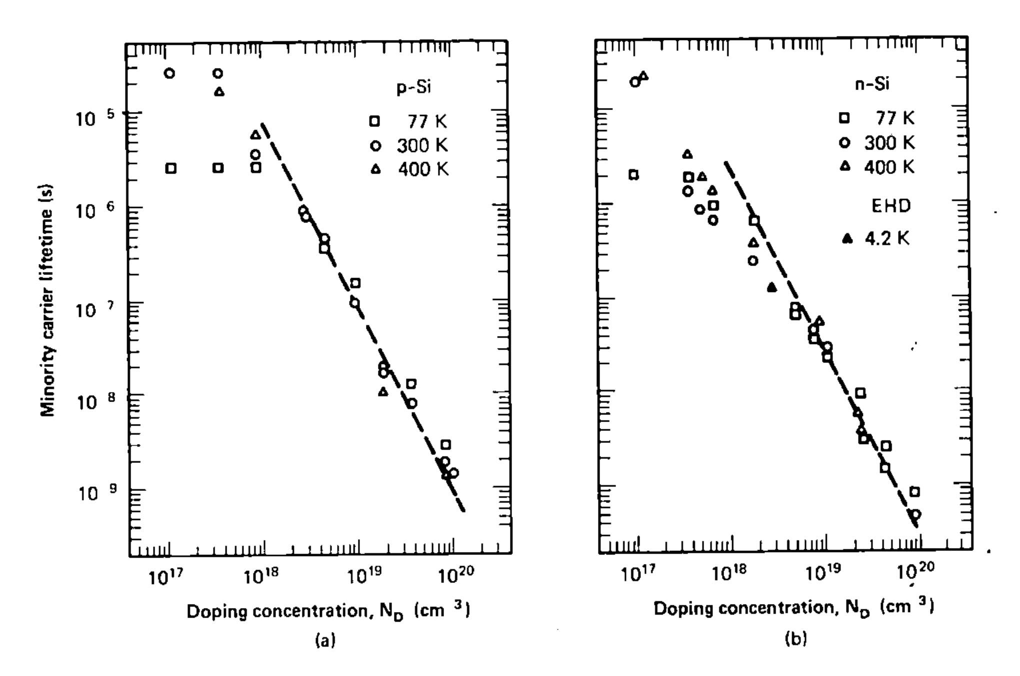
الشكل (3.10) اعادة اتحاد اوشي نتيجة الطاقة الزائدة التي تمتلكها
(a) حزمة التوصل
(b) حزمة التكافؤ .

اما بالنسبة للمواد التي تحتوي فيضاً من الالكترونات والفجوات على التوالي. فان الحد الاول من جهة اليمين من المعادلة يصف اثارة الالكترون في حزمة حاملات الاقلية والحد الثاني يصف الاثارة في حزمة حاملات الاغلبية ان تأثير اعادة اتحاد اوشي فعال خاصة في شبه الموصل عالي التطعيم (highly doped) نسبياً وفق الحد الثاني هذا. ان عملية اعادة اتحاد اوشي هي اكثر عمليات اعادة الاتحاد حدوثاً في السليكون عالي الجودة وذي نسبة من التطعيم تزيد على 10^{17} cm^{-3} . وان النتائج التجريبية لتغيير الديمومة للحاملات مع كثافة شوائب ثلاثية وخماسية التكافؤ للسيلكون عالي الجودة جيدة ويبين الشكل (3.11) الانخفاض السريع للديمومة عند كثافة الشوائب العالية نتيجة لعمليات اتحاد اوشي.

3-4-4 اعادة الاتحاد خلال القانصات

Recombination through traps

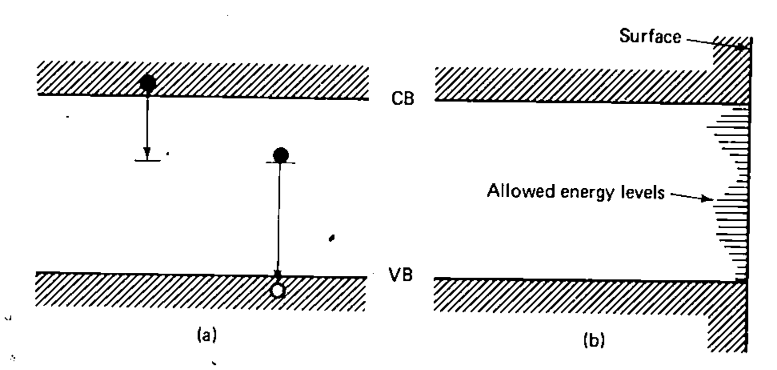
لقد مر التأشير في الفصل الثاني ان الشوائب والعيوب (defects) في اشباه الموصلات تحدث مستويات طاقة مسموحة في الفجوة المحظورة وهذه المستويات تسبب



الشكل **3.11** يوضح ديمومة اعادة الاتحاد عملياً في سليكون عالي الجودة. الخطوط المتقطعة تمثل الاعتماد الرباعي نظرياً. (a) سليكون نوع ــ موجب و (b) سليكون نوع ــ سالب

(After J. Dziewior and W. Schmid Appl phys letters. 31 (977) 346-348)

عملية اعادة الاتحاد ذات المرحلتين حيث يسترخي الالكترون في حزمة التوصيل الى المستويات الناتجة من العيوب ويستمر في الاسترخاء الى ان يصل الى حزمة التكافؤ ويتحد مع الفجوة فتتلاشى كما مبين في الشكل (3.12a) .



الشكل 3.12 (a) عملية اعادة الاتحاد ذات المرحلتين خلال مستوى الشرك ضمن الفجوة المحظورة لاشباه الموصلات (b) المراتب السطحية الواقعة ضمن الفجوة المحظورة عند سطح شبه الموصل .

ان التحليل الرياضي لديناميكية هذه العملية بسيط ولكن طويل (المرجع 3.4) النتيجة النهائية لمعدل التوليد واعادة الاتحاد $U_{T'}$ بواسطة القانصات هي

$$U_P = \frac{np - n_i^2}{\tau_{h0}(n + n_1) + \tau_{e0}(p + p_1)} \qquad (3.22)$$

حيث ان τ_{h0} و τ_{e0} معاملات الديمومة والتي تعتمد قيمتها على نوع القانصات والكثافة الحجمية للعيوب و n و p_1 معامل تظهر من التحليل الرياضي وتشتمل على اعتماد معدل اعادة الاتحاد على طاقة مستوى القانصات E_t وفق المعادلات

$$n_1 = N_C \exp\left(\frac{E_t - E_c}{kT}\right) \qquad (3.23)$$

$$n_1 p_1 = n_i^2 \qquad (3.24)$$

وان المعادلة (3.23) شبيهة في شكلها بالعلاقة التي تحدد تركيز الالكترونات بدلالة مستوى فيرمي (Ferim energy) الموصوفة بالمعادلتين (2.14) و (2.15) وعندما تكون τ_{e0} و τ_{h0} لهما نفس المرتبة في المقدار ومن السهل ان يتبين ان U_T يكون

له القيمة العظمى عندما تكون $n_1 \approx p_1$. وهذا يحدث عندما يقع مستوى الطاقة للعيوب بالقرب من منتصف الحزمة المحظورة . ولذلك فان الشوائب التي تحدث مستويات طاقة قريبة من وسط الفجوة المحظورة تكون مراكز اعادة اتحاد (recomibnation enters) فعالة جداً .

3.4.5 اعادة الاتحاد عند السطوح Recombination at surfaces

تعد السطوح اشد العيوب في التركيب البلوري وتكون موقعاً لكثير من المستويات المسموحة داخل الفجوة المحظورة كما مبين في الشكل (3.12b) لذا فان اعادة الاتحاد تحدث بشكل فعال جداً عند السطوح بنفس الالية الموضحة في الفقرة 3.4.4 وان المحصلة لاعادة الاتحاد لوحدة المساحة U_A لمستوى واحد من المراتب السطحية تأخذ شكل معادلة (3.22) .

$$U_A = \frac{S_{e0} S_{h0} (np - n_i^2)}{S_{e0}(n + n_1) + S_{h0}(p + p_1)} \tag{3.25}$$

حيث S_{eo} و S_{ho} هي سرعة اعادة الاتحاد السطحية وتصبح مستويات الطاقة القريبة من وسط الفجوة المحظورة مراكز فعالة جداً .

3.5 المعادلات الاساسية لنبائط اشباه الموصلات
Basic Equations of Smiconductor Devices

3.5.1 المقدمة Introduction

في الفقرات السابقة عرضنا الخصائص المهمة لاشباه الموصلات اما الان فنحاول دمج وتوحيد هذه الخصائص في معادلات اساسية بحيث تكون قادرة على توضيح عمل نبائط اشباه الموصلات وان حل هذه المعادلات يساعد على تحديد كثير من الخصائص المثالية لمعظم هذه النبائط وبضمنها الخلايا الشمسية .
وتكون هذه المعادلات في بعد واحد (one dimention) مع ذكر الاختلافات التي قد تحصل في بعدين او ثلاثة ابعاد . ان شكل هذه المعادلات في ثلاثة ابعاد شبيهة ببعد واحد غير ان الاشتقاقات في البعد الواحد تبدل بالمؤثرات التفريقية (divergence operator) للكميات الاتجاهية (المجال الكهربائي ، كثافة التيار) والمؤثرات التقريب للكميات غير الاتجاهية (التراكيز والضغوط) في الابعاد الثلاثة .

3.5.2 معادلة بوازن Poissons Equetion

ان اول معادلة نحن بصددها ربما تكون مألوفة للقارىء في موضع الكهربائية المستقرة ، وهي معادلة بوازن (poisson's equation) وهي احدى معادلات ماكسويل (المرجع 3.5) التي تبين علاقة تفريق المجال الكهربائي بكثافة شحنة الفضاء ρ في بعد واحد وتأخذ الشكل الاتي :

$$\frac{d\xi}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon} \qquad (3.26)$$

حيث ثابت السماحية للمادة وهذه المعادلة هي شكل تفاضلي لقانون كاوس (Gauss's Law) والذي يكون أكثر وضوحاً للقاريء وعند النظر الى المصادر المحددة لكثافة الشحنة الموجودة في شبه الموصل ، فان الالكترونات الموجودة في حزمة التوصيل تمد الشحنة السالبة في حين ان الفجوات في حزمة التكافؤ تمد الشحنة الموجبة والشوائب المانحة التي تتأين (اي التي ازيل منها الالكترون الاضافي) وتمد الشحنة الموجبة نتيجة لشحنة موجبة غير متعادلة عند النواة . وبالطريقة نفسها فان الشوائب القابلة تمد شحنة سالبة . لذا

$$\rho = q(p - n + N_D^+ - N_A^-) \qquad (3.27)$$

حيث p و n هي كثافة كل من الفجوات والالكترونات و N_D^+ و N_A^- هي كثافة كل من شحنة المانحات والقابلات المتأينة على التوالي ، وتعمل الشوائب غير الخاصة بالتطعيم ايضاً كمراكز لخزن الشحنة لذلك يجب ان تشمل معادلة 3.27 . حدوداً تمثل هذه المراكز لكنه عند عمل الخلايا الشمسية تبقى هذه المراكز قليلة جدا بحيث يكون اسهام هذه الشحنات غير مهم .

وكما ذكر في الفصل الثاني فان معظم المانحات والقابلات تتأين تحت الظروف الاعتيادية وبذلك نحصل على :

$$N_D^+ \approx N_D \qquad N_A^- \approx N_A \qquad (3.28)$$

عندما يكون N_D و N_A الكثافة الكلية للمانحات والقابلات

3.5.3 معادلات كثافة التيار Current-Density Equautions

كما وجدنا في الفصل الثالث ان كل من الالكترونات والفجوات تستطيع ان تسهم في سريان التيار وذلك بواسطة عمليتي الانجراف والانتشار . لذا فان التعبير عن كثافة التيار الكلية للالكترونات والفجوات J_e و J_h يكون كالاتي

$$J_e = q\mu_e n \xi + qD_e \frac{dn}{dx}$$
$$J_h = q\mu_h p \xi - qD_h \frac{dp}{dx} \qquad (3.29)$$

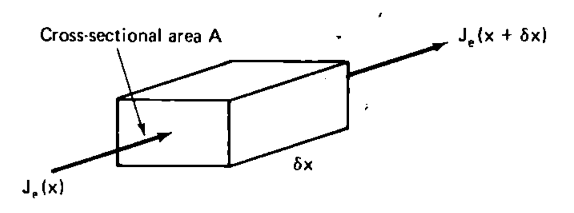
وهناك العلاقة بين التحركية وثابت الانتشار وفق علاقات اينشتاين

$$[D_h = (kT/q)\mu_h \qquad D_e = (kT/q)\mu_e]$$

3-5-4 معادلات التواصل Continuity Equations

ان المعادلات الاخيرة لكثافة التيار المذكور اعلاه هي من نوع حصر الشحنات حيث تجعل مسار عدد من الالكترونات والفجوات داخل المنظومة مع التأكد من عدم الخروج عنها

ولو اخذ حجم صغير جداً من المادة طوله δx ومساحة مقطعه A كما مبين من الشكل 3.13 فمن الممكن ان يتضح بأن معدل الزيادة للألكترونات في هذا الحجم يساوي المعدل الداخل ناقصاً المعدل الخارج زائداً معدل الالكترونات المتولدة في هذا الحجم ناقصاً معدل اعادة لاتحاد .



الشكل 3.13 عنصر حجم صغير جداً لاشتقاق معادلات الاستمرارية للالكترونات

غير ان معدل الالكترونات الداخلة والخارجة يتناسب طردياً مع كثافة التيار عند الاوجه المتعاقبة لهذا الحجم لذا

معدل الدخول - معدل الخروج = $\frac{A}{q}\{-J_e(x) - [-J_e(x+\delta x)]\}$

$$= \frac{A}{q}\frac{dJ_e}{dx}\delta x \qquad (3.30)$$

rate of generation -rate of recombination $= A\,\delta x\,(G - U)$ 3.31

معدل التوليد — معدل اعادة الاتحاد

حيث G معدل التوليد للحاملات بواسطة المحفزات الخارجية مثل الاضاءة بالضوء و U هو معدل اعادة لاتحاد . ولذا تكون محصلة الزيادة في عدد الالكترونات حالة الاستقرار صفراً وعليه فان :

$$\frac{1}{q}\frac{dJ_e}{dx} = U - G \qquad (3.32)$$

وبالطريقة نفسها للفجوات تكون

$$\frac{1}{q}\frac{dJ_h}{dx} = -(U - G) \qquad (3.33)$$

3.5.5 مجمل المعادلات Equation Set

ومجمل المعادلات الاساسية التي حصلنا عليها في هذا الفصل هي .

$$\frac{d\xi}{dx} = \frac{q}{\epsilon}(p - n + N_D - N_A)$$

$$J_e = q\mu_e n\xi + qD_e\frac{dn}{dx}$$

$$J_h = q\mu_h p\xi - qD_h\frac{dp}{dx} \qquad (3.34)$$

$$\frac{1}{q}\frac{dJ_e}{dx} = U - G$$

$$\frac{1}{q}\frac{dJ_h}{dx} = -(U - G)$$

كما أن هناك حاجة الى بعض العلاقات الاضافية المساعدة لكل من U و G والتعبير عن هذه العلاقات الاضافية يعتمد على نوع العمليات المتضمنة لها .

وتشكل المعادلات 3.34 مجموعة من المعادلات التفاضلية اللاخطية والتي لايمكن حلها بالطرق التحليلية العامة . ولكن يمكن حلها عددياً بواسطة الحاسب الرقمي (digital computer) ليعطي بعض الخواص المثالية لمدى معين من التراكيب لنبائط اشباه المواصلات . وقد طبقت هذه الطريقة على الخلايا الشمسية في المراجع (3.6) الى (3.7) . كما انه من الممكن الحصول على حلول جيدة لهذه المعادلات ببساطة مع فهم جيد للمفاهيم الفيزيائية المتعلقة بها وذلك بأخذ سلسلة من التقريبات الرياضية وهذه الطريقة ستفصل في الفصل الرابع .

3.6 الخلاصة SUMMARY

ان الضوء الساقط على شبه الموصل المتكون من فوتونات ذات طاقة اعلى من طاقة الفجوة المحظورة تمتص وتولد ازواج الكترون ـ فجوة . وتمتص اشباه الموصلات ذات الفجوة المباشرة الضوء مباشرة وبسرعة بينما اشباه الموصلات ذات الفجوة غير المباشرة تحتاج الى عملية انبعاث او امتصاص الفوتونات لتمتص فوتونات ذات طاقة قريبة من طاقة الفجوة المحظورة . وبذلك يكون شبه الموصل ماصاً رديئاً لهذا النوع من الفوتونات ويصبح ماصاً جيداً للفوتونات ذات الطاقة العالية حيث يزيد من احتمالية الانتقال المباشر ايضاً . ويحدث اعادة الاتحاد لحاملات الشحنات الزائدة عن القيم المتوازنة بواسطة عمليات مختلفة . فعملية اعادة الاتحاد الاشعاعي هي عملية معاكسة لعملية امتصاص الضوء ومن العمليات المهمة لاشباه الموصلات المباشرة اما اعادة اتحاد اوشي فتظهر اهميتها عندما يكون تركيز الشوائب عالياً بينما اعادة الاتحاد من خلال القابض والذي تسببه الشوائب والعيوب البلورية تكون من العمليات المهمة في اشباه الموصلات غير المباشرة واشباه الموصلات غير المتطورة تقنياً . وعمليات اعادة الاتحاد هذه تحدث متوازية بعضها مع بعض . ومعدل اعادة الاتحاد الكلي ماهو الا حاصل جمع المعدلات . وإن مقلوب ديمومة اعادة الاتحاد الكلي يساوي مجموع مقلوب ديمومة كل عملية اعادة اتحاد على انفراد . وتحدث عملية اعادة الاتحاد بصورة خاصة عند سطح الموصل .

ان النتيجة النهائية لمراجعة خصائص اشباه الموصلات والتي تعتبر نقطة البداية لتحليل خصائص الخلايا الشمسية ، هي مجموعة من المعادلات التفاضلية تساعد على تحليل خصائص الخلايا الشمسية وربط التوزيعات الخاصة لعناصر مهمة لفهم العمل الداخلي للخلايا الشمسية . والطرق الخاصة لحل هذه المعادلات التفاضلية يكون في الفصل الآتي .

تمارين

3-1• اذا سقط ضوء احادي التردد بصورة عمودية على سطح مستوي للسليكون باستخدام المعلومات في الشكل 1-3 . احسب الجزء المنعكس من الاطوال الموجية التالية (a) 1000 نانومتر (b) 400 نانومتر (c) 300 نانومتر [جدير بالملاحظة ان نتذكر العلاقة بين طاقة الفوتون والطول الموجي في الفراغ $\lambda\,(\mu m) = 1.24/hf\,(eV)$.]

3-2• (a) سقط ضوء احادي اللون بفيض N من الفوتونات لوحدة المساحة لكل ثانية على شبه الموصل وانعكس منه جزء R . اذا علمت ان معامل الامتصاص لهذا الشبه الموصل عند هذا الطول الموجي α فما علاقة فيض الفوتونات كدالة للمسافة x عند اختراقه شبه الموصل .

(b) اذا علمت ان كل فوتون من الفوتونات الممتصة يولد ثنائي الكترون ـ فجوة . اوجد العلاقة بدلالة المعالم المذكورة اعلاه لمعدل التوليد G لهذه الثنائيات مرة ثانية كدالة للمسافة خلال شبه الموصل .

3-3• تقع ذروة فيض فوتونات ضوء الشمس على سطح الأرض عند 700 نانومتر باستخدام المعلومات الواردة في الشكل 4-3 و 6-3 قارن العمق الذي يتوهن عنده الفيض لـ 10% الى قيمته الأصلية من كل من Si و GaAs .

3-4• في نموذج معين من شبه الموصل ديمومة واعادة الاتحاد الاشعاعي للحاملات الاقلية كان 100 مايكروثانية ديمومة اعادة اتحاد اوشي 50 مايكروثانية ولأعادة الاتحاد بالقنص 10 من مايكروثانية بفرض انه ليس هناك عمليات ثانوية اخرى لاعادة الاتحاد . ما محصلة ديمومة اعادة الاتحاد لهذه المادة ؟

3-5• تم اضاءة عينة سليكون نوع ـ n بحيث كانت كثافة الالكترونات ثابتة بـ 10^{22} لكل متر مكعب وكثافة ثابتة من الفجوات بـ 10^{14} فجوة لكل متر مكعب . بين فعالية اعادة الاتحاد بالقنص كدالة لطاقة القنص وذلك بحساب معدل اعادة الاتحاد للالكترونات والفجوات بفرض ان مستوى الطاقة للقنص يقع تحت حافة حزمة التوصيل وعند :

a-0.03 الكترون فولت

b-0.3 الكترون فولت

c-0.5 الكترون فولت
d-0.8 الكترون فولت
e-1.0 الكترون فولت

افرض ان كثافة القنص ومقاطع العرض للقنص لها في كل حالة بحيث تكون τ_{e0} و τ_{h0} تساوي 1 مايكروثانية . استخدام القيم $N_C = 3 \times 10^{25}\ m^{-3}$ و $n_i = 1.5 \times 10^{16}\ m^{-3}$ وكذلك $kT/q = 26\ mV$.

من الخصائص الالكترونية لاشباه الموصلات . بين لماذا يزداد معامل الامتصاص بازدياد طاقة الفوتون للطاقات القريبة من الفجوة المحظورة لشبه الموصل .

REFERENCES المراجع

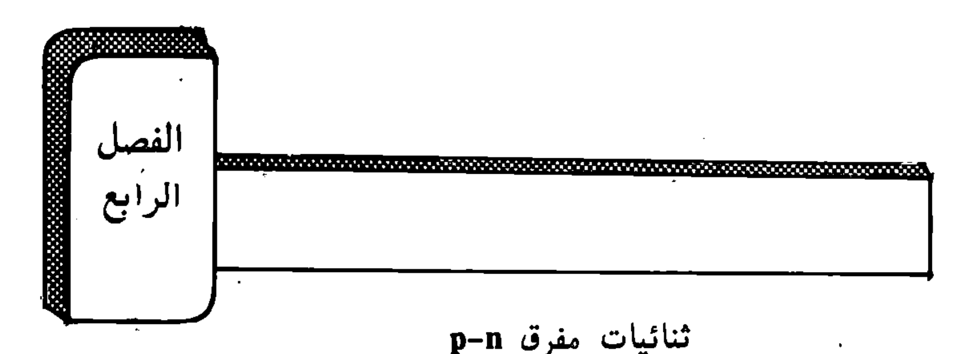
[2.1] V. AZAROFF AND J. J. BROPHY, *Electronic Processes in Materials* (New York: McGraw-Hill, 1963).

[2.2] A. VAN DER ZIEL, *Solid State Physical Electronics*, 3rd ed. (Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1976).

[2.3] S. WANG, *Solid-State Electronics* (New York: McGraw-Hill, 1966).

[2.4] W. SHOCKLEY, *Electrons and Holes in Semiconductors* (New York: Van Nostrand Rheinhold, 1950).

[2.5] D. M. CAUGHEY AND R. E. THOMAS, "Carrier Mobilities in Silicon Empirically Related to Doping and Field," *Proceedings of the IEEE 55* (1967), 2192-2193.

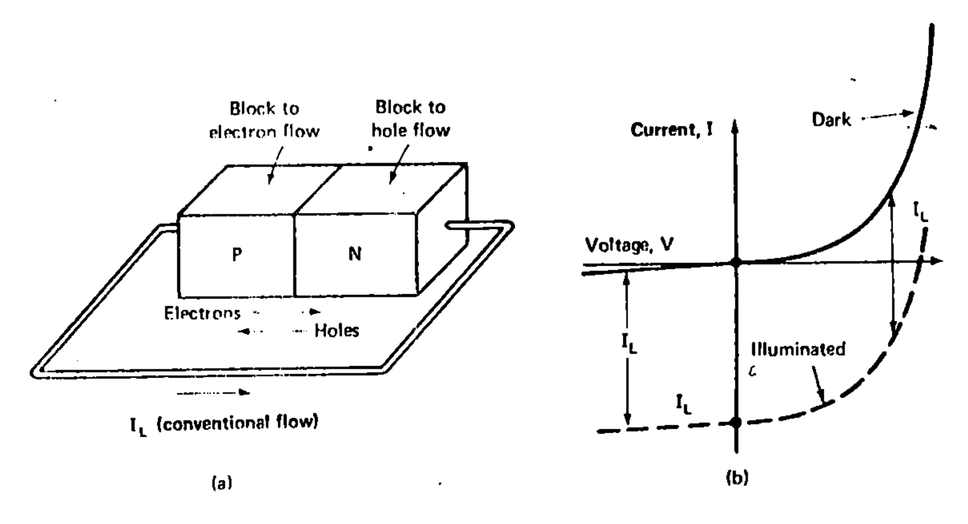


ثنائيات مفرق p-n

p-n JUNCTION DIODES

4.1 المقدمة INTRODUCTION

ان شبه الموصل المطعم بشوائب واهبة (donor) والذي تملك عدداً كبيراً من الالكترونات في حزمة التوصيل عند درجة الحرارة الاعتيادية يعرف بنوع السالب (n-type) امـا المطعم بشوائـب قـابلـة (acceptors) يعرف بنوع الموجـب (p-type) . ان أغلب الخلايا الشمسية هي في الحقيقة مساحة كبيرة من ثنائيات مفرق p-n . وتتكون هذه الثنائيات من وصل مناطق نوع سالب ونوع موجب . وفي هذا الفصل نحاول تحليل الخصائص الاساسية لهذا الفرق عندما يكون في الظلام وعندما يضاء. ومن المتطلبات الاساسية للنبائط اللاتناظر الالكتروني في تركيب شبه الموصل لتجويل الطاقة بظاهرة الفتوفولطائية . والشكل (4.1a) يوضح هذه الخاصية في مفرق p-n حيث نوع n- يملك كثافة عالية من الالكترونات وكثافة واطئة من الفجوات ولذا فان الالكترونات تتحرك بسهولة خلال هذه المادة بينما الفجوات تلاقي صعوبة كبيرة عند الحركة . والعكس يكون صحيحاً لنوع p- . وعند إضاءة . مفرق p-n تتولد أعداد كبيرة من ازواج الكترون ـ فجوة بواسطة الضوء الساقط على امتداد المادة . وبسبب خاصية اللاتناظر في إنتقال الحاملات يتحرك الألكترونات المتولدة من منطقة p- الى منطقة n- وتتحرك الفجوات في الاتجاه المعاكس . وعند عمل الدائرة القصيرة لمفرق p-n المضاء يسري التيار في الدائرة القصيرة . وفي هذا الفصل سيتضح أن هذا التيار المتولد ضوئياً يظهر في خواص التقويم (rectifying) الاعتيادي للثنائي ليعطي منطقة العمل التي يمكن إستخراج القدرة منها كما موضح في الشكل (4.1b)



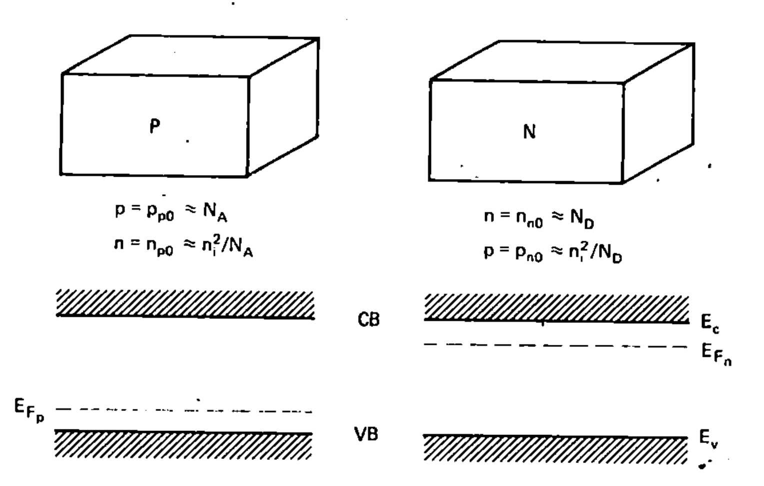
الشكل (4-1) (a) خصائص اللاتناظر لمفرق p-n حيث يسبب هذا سريان التيار في الحمل الخارجي المربوط بالمفرق عند اضاءته (b) هذا التيار المتولد ضوئياً يركب على خواص التيار ـ فولتية للثنائي . وهذا يؤدي الى ظهور المنطقة في الربع الرابع والتي يمكن إستخراج القدرة منها

4-2 الكهربائية المستقرة لمفرق p-n
ELECTROSTATICS OF p-n JUNCTIONS

لنفرض أن قطعة من شبه الموصل معزول ومن نوع n- وأخرى من نوع p- كما مبين في الشكل 2-4 . فإذا تم الاتصال بين القطعتين فأن الالكترونات تجري من مناطق التركيز العالي (جانب نوع n-) الى مناطق التركيز الواطيء (جانب نوع p-) .

وكذلك بالنسبة للفجوات . فأن الكترونات جانب نوع n ـ تترك خلوعاً بشحنات موجبة غير متعادلة وبطريقة مشابهة يترك الفجوات جانب نوع P ـ وتترك خلوعاً بشحنات سالبة . وهذه الشحنات المتخلفة تحدث مجالاً كهربائياً يعارض اتجاه حركة الانتشار الطبيعي للألكترونات والفجوات وتتكون بذلك حالة من التوازن الحراري .

ومن الممكن وصف حالة التوازن الحراري بواسطة مناسيب فرمي ، حيث يكون للمنظومة في حالة التوازن الحراري منسوب فيرمي واحد فقط .



الشكل (4.2) قطعة معزولة من شبه الموصل من النوع السالب وأخرى من النوع الموجب مع الرسم التخطيطي لحزمة الطاقة لها .

وبعيداً من الوصل الفعلي للمفرق من الممكن اعتبار المادة غير متأثرة ولاتختلف عن وضعها في الحالة المعزولة . بالرجوع الى الشكل 3-4 يتبين انه يجب ان يكون هناك منطقة انتقال (transition region) قرب المفرق . ويحدث عندها تغيير في الجهد ψ_0. وإن قيمة ψ_0 ممكن ايجادها من هذا الشكل حيث ان

$$q\psi_0 = E_g - E_1 - E_2 \qquad (4.1)$$

إن التعبير الرياضي لكل من E_1 و E_2 المشتق من المعادلتين (28-2) و (30-2) وكذلك موضح في الشكل 3-4 لذا

$$\begin{aligned} q\psi_0 &= E_g - kT\ln\left(\frac{N_V}{N_A}\right) - kT\ln\left(\frac{N_C}{N_D}\right) \\ &= E_g - kT\ln\left(\frac{N_C N_V}{N_A N_D}\right) \end{aligned} \qquad (4.2)$$

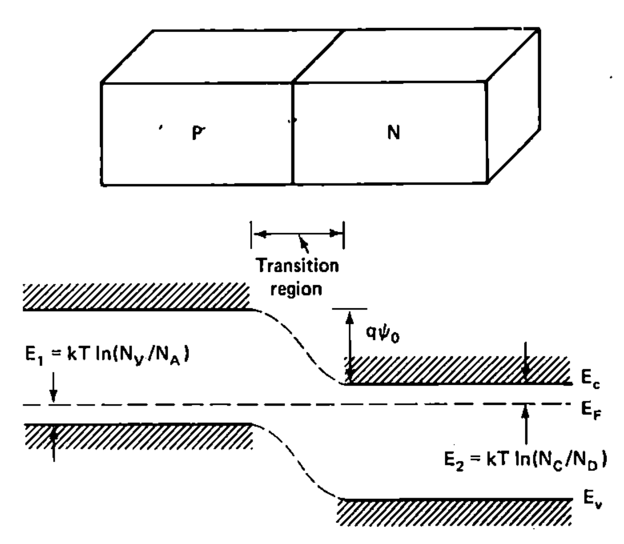
ولكن من المعادلة (17-2)

$$n_i^2 = N_C N_V \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$$

لذلك

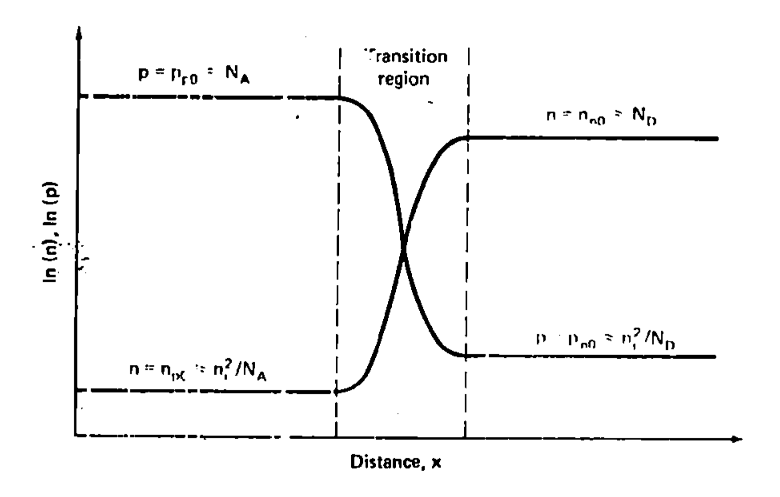
$$\psi_0 = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) \quad (4.3)$$

عند تسليط V_a يتغير فرق الجهد بين جانبي الثنائي بمقدار V_a لذا يكون الجهد عبر منطق الانتقال $(\psi_0 - V_a)$.



الشكل 3-4 مفرق p-n يتكون من اتصال قطعتين معزولتين احداهما من النوع السالب والاخرى من النوع الموجب . وكذلك الرسم التخطيطي لحزمة الطاقة عند التوازن الحراري للمفرق المبين في نفس الشكل .

ومن المفيد رسم تركيز الحاملات وفق مخطط الطاقة الموضح في الشكل (3-4) . ان هذا التركيز يعتمد أسياً على فرق الطاقة بين منسوب فيرمي وحزمة التوصيل أو حزمة التكافؤ . ويبين الشكل (4-4) المخطط الناتج للتركيز على ورق بياني لوغارتمي . وكما يبين الشكل 5-4 (الخط المتقطع) كثافة شحنة الفضاء الناتج من المعادلة (27-3) . وان التغير المفاجيء لـ ρ قرب حافة منطقة الاستنزاف (depletion region) يؤدي الى التقريب رقم 1 ، تقريب إستنزاف (depletion approximation) .



الشكل 4-4 التخطيط الوغارتمي لكثافة الالكترونات والفجوات المناظرة للشكل 3-4 وبما ان هذا التركيز يعتمد اسياً على الطاقة بين منسوب فيرمي وكل من حزمة التوصيل وحزمة التكافؤ فيكون على شكل التوزيعات على مقياس لوغارتمي خطياً بالنسبة للشكل 3-4 .

في هذا التقريب تنقسم النبيطة الى منطقتين : منطقة شبه متعادلة (quasi-nutral region) تكون كثافة شحنة الفضاء على طول هذه المنطقة صفراً . ومنطقة الاستنزاف يكون تركيز حاملات الشحنة فيها صغيراً جداً اذا ان الاسهامات الى كثافة شحنة الفضاء تأتي من الشوائب المتأينة فقط . وهذا التقريب في الحقيقة يجعل توزيع شحنة الفضاء حادة اكثر ، كما مبين بالخط المتواصل في الشكل (4.5a) .

بأستخدام هذا التقريب يكون من السهل ايجاد المجال الكهربائي وتوزيع الجهد خلال منطقة الاستنزاف كما مبين في الشكل (4.5b) و (c) و (d) . ويأتي هذا من التكامل المتعاقب اخذين بنظر الاعتبار ان شدة المجال الكهربائي هي الانحدار السالب للجهد . وان النتائج لاعلى شدة للمجال في منطقة الاستنزاف ξ_{max} وعرض منطقة الاستنزاف (W) وكذلك عمق هذه المنطقة من كل جانب من جانبي المفرق (l_p) (المرجع 1-4) تعطي بالمعادلات التالية :

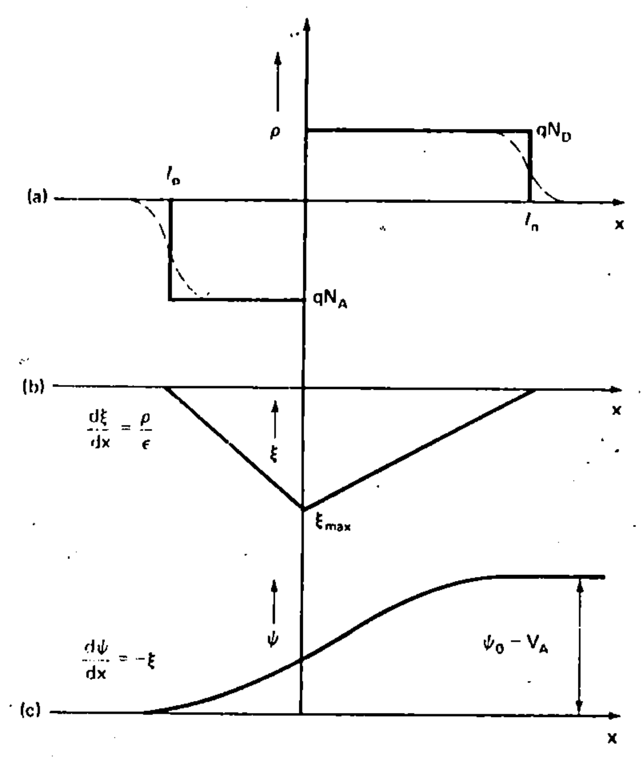
$$\xi_{max} = -\left[\frac{2q}{\epsilon}(\psi_0 - V_a)\Big/\left(\frac{1}{N_A}+\frac{1}{N_D}\right)\right]^{1/2}$$

$$W = l_n + l_p = \left[\frac{2\epsilon}{q}(\psi_0 - V_a)\left(\frac{1}{N_A}+\frac{1}{N_D}\right)\right]^{1/2} \qquad (4.4)$$

$$l_p = W\frac{N_D}{N_A + N_D} \qquad l_n = W\frac{N_A}{N_A + N_D}$$

4-3 سعة المفرق JUNCTION CAPACITANCE

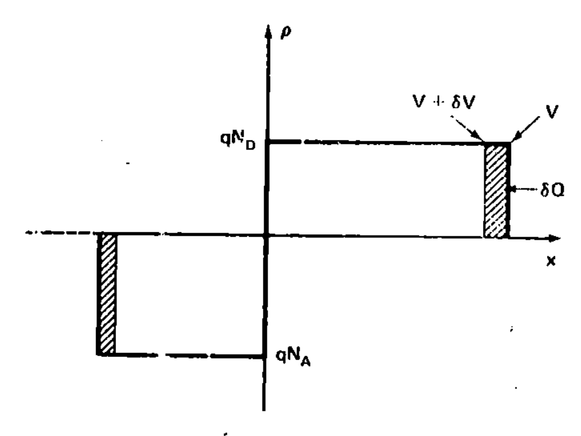
من السهل جداً الكشف عن منطقة الاستنزاف في الثنائي p-n وقياس عرضها . وفق التقريب الاول اي تقريب الاستنزاف وهو تغيير في الفولتية المسلطة



الشكل (5-4) (a) كثافة شحنة الفضاء المناظر للشكل 5-4 . الخط المنقط يبين التوزيع الحقيقي بينما الخط المتواصل يبين التوزيع المفترض في التقريب الاول للاستنزاف (b) شدة المجال المناظر (c) توزيط توزيع الجهد المناظر .

يؤدي الى تغيير مباشر في الشحنة المخزونة عند الحافات لهذه المنطقة كما مبين في الشكل(6-4). وهذه الحالة مماثلة لحالة متسعة ذات لوحين متوازيين تفصلهما المسافة W . لذا فان سعة منطقة الاستنزاف تساوي

$$C = \frac{\epsilon A}{W} \tag{4.5}$$



الشكل (6-4) التغير في الشحنة المخزونة في منطقة الاستنزاف عندما تزيد الفولتية المسلطة تدريجياً (تقريب الاستنزاف) .

عندما يعطي W بالمعادلة (4-4) . فاذا كان احد جانبي الثنائي يطعما بشكل كثيف فان المعادلة (4-5) تختصر الى

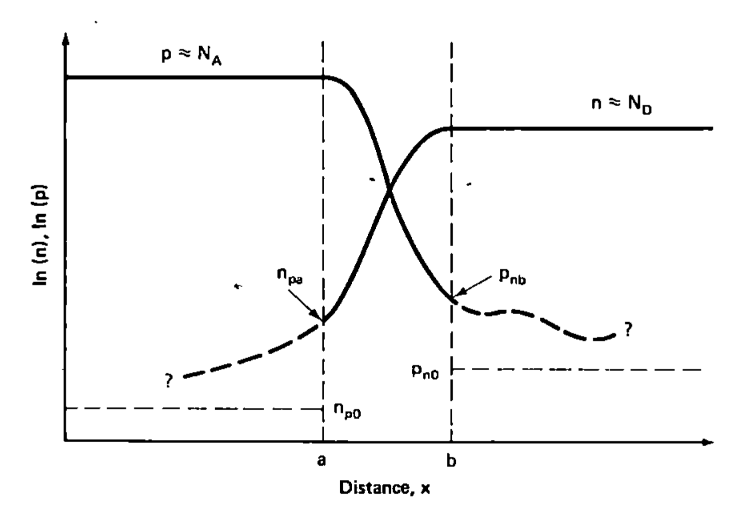
$$\frac{C}{A} = \left[\frac{q\epsilon N}{2(\psi_0 - V_a)}\right]^{1/2} \tag{4.6}$$

حيث N هو الاصغر مابين N_A و N_D . تحت الانحياز العكسي فان سعة منطقة الاستنزاف تسود السعة الكلية للثنائي فعند قياس C كدالة للانحياز العكسي لثنائي القطب أو الخلية الشمسية ورسم $1/C^2$ كدالة لـ V_a يمكننا من ايجاد كثافة التطعيم N في الجانب الاقل تطعياً . ومن الممكن استخدام تقنية مشابهة (المرجع 2-4) لحساب التغيير الموقعي لكثافة التطعيم في الحالة التي تكون هذه الكمية غير ثابتة .

4-4 حقن حاملات الشحنة CARRIER INJECTION

تتضمن الحسابات التالية ايجاد تركيز حاملات الشحنة عند حافة منطقة الاستنزاف كدالة لفولتية الانحياز . وبالرجوع الى الشكل 4.7 نلاحظ وجوب ايجاد قيمة n_{pa} و p_{nb} وعندما يكون الانحياز صفراً فان قيمتها (شكل 4-4) هي :

$$
\begin{aligned}
p_{nb} &= p_{n0} = p_{p0} \exp\left(-\frac{q\psi_0}{kT}\right) \approx \frac{n_i^2}{N_D} \\
n_{pa} &= n_{p0} = n_{n0} \exp\left(-\frac{q\psi_0}{kT}\right) \approx \frac{n_i^2}{N_A}
\end{aligned}
\qquad (4.7)
$$



الشكل 4-7 رسم تخطيطي لتراكيز الحاملات عند تسليط الفولتية على مفرق p-n . في المتن تجد التعبير الرياضي لتراكيز الحاملات الاقلية n_{pa} و p_{nb} عند حافة منطقة الاستنزاف للمفرق وكذلك الشكل الدقيق للتوازيع مبين في خطوط منقطة .

يوجد ضمن منطقة الاستنزاف كل من شدة المجال الكهربائي العالية والانحدار في التركيز فان محصلة التيار الذي يسري خلال هذه المنطقة في الحقيقة هي الفرق الصغير بين كميتين كبيرتين للفجوات مثلا :

$$J_h = q\mu_h p \xi - qD_h \frac{dp}{dx} \tag{4.8}$$

ِان كلاً من تياري الانجراف (drift) والانتشار (diffusion) كبيرين ولكنهما متعاكسين في الاتجاه وهما متساويان عند الانحياز الصفري. اما عند الانحياز المعتدل فان سريان التيار يساوي الاختلاف الصغير بين هذين الحدين الكبيرين جداً . وهذا يؤدي الى التقريب رقم 2·2 (approximation 2) ، حيث تكون في مناطق الاستنزاف :

$$q\mu_h p \xi \approx qD_h \frac{dp}{dx} \tag{4.9}$$

أو بعبارة اخرى

$$\xi \approx \frac{kT}{q} \frac{1}{p} \frac{dp}{dx} \tag{4.10}$$

باستخدام علاقة اينشتاين بين μ_h و D_h . وبتكامل سالب طرفي المعادلة (4-10) خلال منطقة الاستنزاف ينتج

$$\begin{aligned} \psi_0 - V_a &= -\frac{kT}{q} \ln p \Big|_a^b \\ &= \frac{kT}{q} \ln \frac{p_{pa}}{p_{nb}} \end{aligned} \tag{4.11}$$

أو بشكل اخر

$$p_{nb} = p_{pa} e^{-q\psi_0/kT} e^{qV_a/kT} \tag{4.12}$$

ولكن من تعادل شحنة الفضاء عند نقطة a واستخدام التقريب رقم 3 (approximation-3) الذي يأخذ بنظر الاعتبار بان الحالات التي تكون عندها تركيز حاملات الاقلية (minority carriers) اقل بكثير من تركيز الحاملات الأكثرية (majority carriers) ($p_{pa} \gg n_{pa}, n_{na} \gg p_{na}$) ، فينتج :

$$p_{pa} = N_A + n_{pa}(\text{عندما } n_{pa} \text{ صغير جداً}) \approx p_{p0} \approx p_{n0} e^{q\psi_0/kT} \qquad (4.13)$$

ولذا

$$\boxed{\begin{aligned} p_{nb} &= p_{n0} e^{qV_a/kT} = \frac{n_i^2}{N_D} e^{qV_a/kT} \\ n_{pa} &= n_{p0} e^{qV_a/kT} = \frac{n_i^2}{N_A} e^{qV_a/kT} \end{aligned}} \qquad (4.14)$$

ومن هذا يتبين ان تركيز حاملات الاقلية عند حافة منطقة الاستنزاف تتزايد أسياً مع زيادة الفولتية المسلطة . وان عملية السيطرة على التركيز بواسطة فولتية انحياز على المفرق تعرف بعملية الحقن للحاملات الاقلية .

4-5 الجريان الانتشاري في مناطق شبه متعادلة

DIFFUSIVE FLOW IN QUASI-NEUTRAL REGIONS

جريان الحاملات يكون بواسطة عمليتي الانجراف والانتشار اذا كانت المنطقة المطعمة بصورة منتظمة في حالة شبه متعادلة (اي كثافة شحنة الفضاء تقريباً صفر) وكذلك جريان حاملات الاقلية لم يكن قليل الأهمية ، فان حاملات الاقلية تجري غالباً بعملية الانتشار .

البرهان : لو اخذنا مادة شبه متعادلة من نوع ـ n عندما يكون $(n \gg p)$ وعندما يكون جريان الحاملات الاقلية له اثره (اي في حالة $J_e \ggg J_h$ والرمز $\ggg$ يستخدم للتعبير عن "ليس اكثر بكثير" فيكون لدينا :

$$J_e = q\mu_e n \xi + qD_e \frac{dn}{dx}$$
$$J_h = q\mu_h p \xi - qD_h \frac{dp}{dx} \qquad (4.15)$$

$$p - n + N_D \approx 0$$

(يعني شبه متعادل)

وبتفاضل المعادلة الاخيرة وباعتبار N_D ثابتاً سيكون لدينا

$$\frac{dp}{dx} \approx \frac{dn}{dx} \qquad (4.16)$$

افرض ان مركبة الانجراف لجريان حاملات الاقلية يمكن اهمالها فأن :

$$|q\mu_h p \xi| \ll \left| qD_h \frac{dp}{dx} \right| \qquad (4.17)$$

وبما ان $n \gg p$ هذا يعني بتطبيق المعادلة 17-4 و 16-4 يكون

$$|q\mu_h n \xi| \gg \left| qD_h \frac{dp}{dx} \right| \gg \left| qD_h \frac{dn}{dx} \right|$$

وكذلك يكون :

$$|q\mu_e n \xi| \gg \left| qD_e \frac{dn}{dx} \right| \qquad (4.18)$$

وبما ان μ_e و μ_h تكونان متقاربتين في القيمة فأن

$$|q\mu_e n \xi| \gg |q\mu_h p \xi| \qquad (4.19)$$

وبربط المعادلتين (4-17) و (4-19) نحصل على النتيجة الاتية :

$$J_e >> J_h$$

وهذا ينافي احد الشروط الاساسية . ولذلك فان الفرضية التي ادت الى المعادلة 4-17 غير صحيحة مما يؤدي الى النتيجة الاتية

$$|q\mu_h p \xi| << \left| qD_h \frac{dp}{dx} \right|$$

اي ان جريان حاملات الاقلية (minority carriers) ، في المناطق شبه المتعادلة يكون اغلبه بواسطة عملية الانتشار والتي تخضع للشروط المذكورة سابقاً . ولذا التقريب رقم (4) هو :

$$J_h = -qD_h \frac{dp}{dx} \quad \text{(منطقة شبه متعادلة من النوع السالب)}$$

(4.20)

$$J_e = qD_e \frac{dn}{dx} \quad \text{(منطقة شبه متعادلة من النوع الموجب)}$$

وكقاعدة عامة ان الاعداد القليلة لحاملات الاقلية مقارنة بالأعداد الكبيرة لحاملات الاغلبية تحجب حاملات الاقلية من تأثير المجال الكهربائي . وفي الفقرات القادمة نبين علاقة هذا التأثير بجريان التيار في ثنائي p-n

4-6 الخصائص الظلامية DARK CHARACTERISTICS

4.6.1 حاملات الاقلية في منطقة شبه متعادلة

Minority Carriers in Quasi-Neutral Regions

عند تلخيص ماتقدم شرحه نلاحظ ان التقريب المعقول للتحليل هو تقسيم الثنائي الى منطقة الاستنزاف ومناطق شحنة الفضاء المتعادلة . ونجد ان تركيز حاملات الأغلبية عند حافة منطقة الاستنزاف تعتمد أسياً على الفولتية المسلطة على الثنائي . وهذه المعلومات موضحة في الشكل 4.7 . وعلاوة على ذلك فقد وجد ان المناطق شبه المتعادلة عندما تكون مطعمة بصورة منتظمة وحاملات الاغلبية قليلة فان حاملات الاقلية تجري بصورة رئيسة بواسطة عملية الانتشار . وهذا يجعل بالامكان حساب التوزيع المبين بالخطوط المتقطعة في الشكل (4.7) .

وعلى الجانب السالب من الثنائي :

$$J_h = -qD_h \frac{dp}{dx} \qquad (4.21)$$

بينما تعطي معادلة الاستمرارية :

$$\frac{1}{q}\frac{dJ_h}{dx} = -(U - G) \qquad (4.22)$$

وقد تم شرح العلاقة الخاصة بمعدل اعادة الاتحاد للحاملات بطرق مختلفة في الفصل الثالث . وفي تعريف ديمومة الحامل من المعادلة (3-19) ، فان معدل اعادة الاتحاد في منطقة ـ n يكون بالشكل التالي :

$$U = \frac{\Delta p}{\tau_h} \qquad (4.23)$$

حيث Δp وهو التركيز الاضافي لحاملات الاقلية اي الفجوات وتساوي التركيز الكلي ، p_n ، مطروحاً منه التركيز عند حالة التعادلة p_{n0} و τ_h هو ديمومة اضطراب صغير في حالة التعادل . وبربط المعادلات الثلاث السابقة نحصل على :

$$D_h \frac{d^2 p_n}{dx^2} = \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_h} - G \qquad (4.24)$$

في حالة الظلام فان كل من G وكذلك $d^2 p_{n0}/dx^2 = 0$ يساوي صفراً لذا يمكن تبسيط المعادلة السابقة الى

$$\frac{d^2 \Delta p}{dx^2} = \frac{\Delta p}{L_h^2} \qquad (4.25)$$

حيث

$$L_h = \sqrt{D_h \tau_h} \qquad (4.26)$$

L_h له ابعاد الطول ويعرف بطول الانتشار (diffusion length) ويعتبر من المعالم المهمة في عمل الخلايا الشمسية فان الحل العام للمعادلة (4.25)

$$\Delta p = A e^{x/L_h} + B e^{-x/L_h} \qquad (4.27)$$

ولايجاد قيمة الثابتين A و B نطبق الشروط الحدودية (boundary conditions) كما يلي:

1- عندما x = o فأن

$$x = 0,\ p_{nb} = p_{n0} e^{qV/kT}$$

2- تكون p_n محدودة ويقترب x من اللانهاية $x \to \infty$ ولذا فان $A = 0$. ومن هذه الشروط الحدودية نحصل

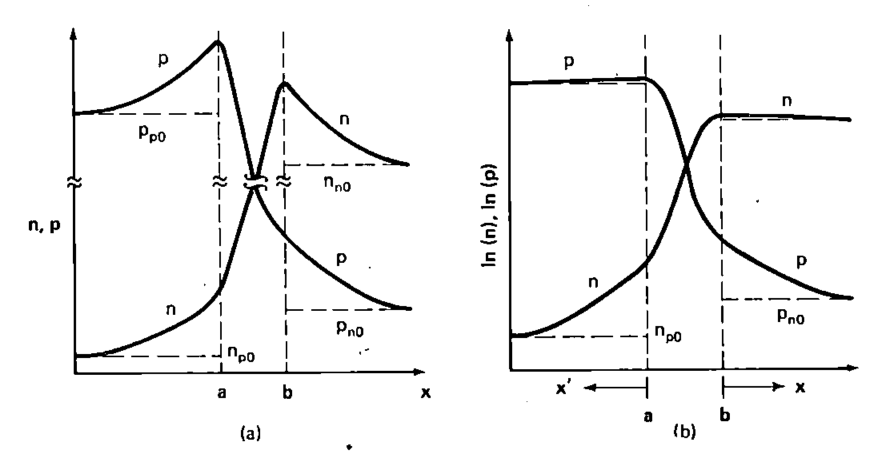
$$p_n(x) = p_{n0} + p_{n0}[e^{qV/kT} - 1]\, e^{-x/L_h} \qquad (4.28)$$

وبطريقة مشابة

$$n_p(x') = n_{p0} + n_{p0}[e^{qV/kT} - 1]\, e^{-x'/L_e} \qquad (4.29)$$

حيث x مبينة في الشكل (b) 4.8 .

يبين الشكل (a) 4.8 تخطيط نتائج تركيز حاملات الاقلية على امتداد النبيطة . ويجب ان يكون تركيز حاملات الاغلبية في المناطق شبه المتعادلة له تغيير مناظر في التوزيع وذلك للحفاظ على تعادل شحنة الفضاء كما مبين الشكل (a) 4.8 . ولو ان التغيرات المطلقة تبقى نفسها فان التغيرات النسبية في الحاملات الأغلبية تكون اقل بكثير كما مبين في التخطيط اللوغارتمي في الشكل (b) 4.8 .



الشكل 4.8 (a) الرسم التخطيطي لتوزيع الحاملات عبر مفرق p-n تحت تأثير الانحياز الامامي (b)- رسم شبه لوغارتمي المناظر. لاحظ الفرق بالنسبة للحاملات الاغلبية.

4.6.2 تيارات حاملات الاقلية Minority-Carrier Currents

من السهل جداً حساب سريان تيار حاملات الاقلية عند معرفة توزيع الحاملات وبما ان التيار يكون انتشارياً في مناطق شبه متعادلة على جانب ــ n :

$$J_h = -qD_h \frac{dp}{dx} \qquad (4.30)$$

وبتعويض معادلة (4-28) يمكن الحصول على :

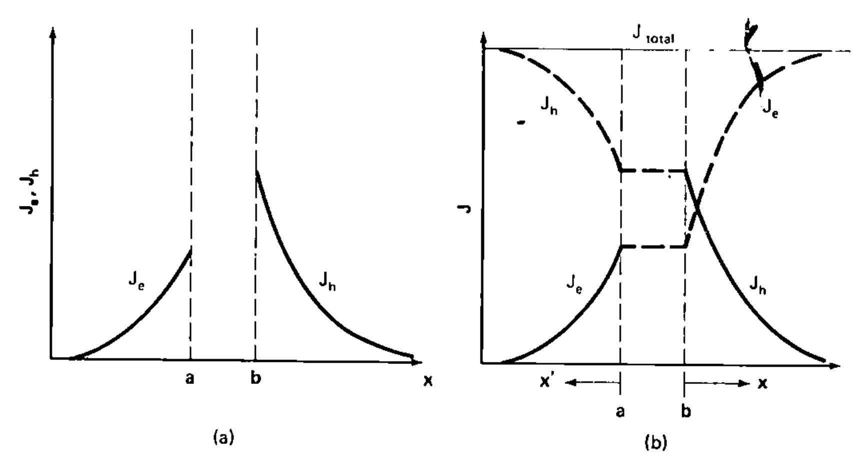
$$J_h(x) = \frac{qD_h p_{n0}}{L_h} (e^{qV/kT} - 1)e^{-x/L_h} \qquad (4.31)$$

وبطريقة نفسها على جانب ــ P :

$$J_e(x') = \frac{qD_e n_{p0}}{L_e} (e^{qV/kT} - 1)e^{-x'/L_e} \qquad (4.32)$$

يوضح الشكل 4.9(a) توزيعات التيار الناتج من هذه العلاقات . لحساب سريان التيار الكلي في ثنائي القطب يكون من الضروري معرفة مركبات كل من الالكترون والفجوة عند النقطة نفسها . اذا اخذنا بنظر الاعتبار سريان التيار في منطقة الاستنزاف وبما ان المعادلات الاستمرارية تعطي

$$\frac{1}{q}\frac{dJ_e}{dx} = U - G = -\frac{1}{q}\frac{dJ_h}{dx} \qquad (4.33)$$



الشكل (4.9) (a) كثافة تيار الحاملات الاقلية في ثنائي القطب المتمثل بشكل (4.8) . (b) توزيع الحاملات الاقلية والاغلبية وكثافة التيار الكلي في ثنائي القطب باهمال اعادة الاتحاد في منطقة الاستنزاف .

لذا فان مقدار التغير في التيار خلال منطقة الاستنزاف :

$$\delta J_e = |\delta J_h| = q \int_{-W}^{0} (U - G)\, dx \qquad (4.34)$$

وبصورة عامة تكون W اقل بكثير من L_e و L_h اللذين يمثلان طول الاضمحلال المميز لكل من J_e و J_h . ومن هذا يتبين ان الشكل 4.9 غير متناسب من حيث القياس . وبما ان W صغير فان التقريب المقبول يفترض حذف التكامل الموجود في المعادلة 4-34 لتصبح $\delta J_e = |\delta J_h| \approx 0$ وهذا يعني ان كل من J_e ، J_h هي ثابتة خلال منطقة الاستنزاف كما موضح في

الشكل 4.9(b) وهذا التقريب هو تقريب رقم 5 ويظهر هذا التقريب بوضوح اذا اعيد رسم W على شكل 4.9(b) بمقياس متناسب . ومن الممكن الان ايجاد التيار الكلي وذلك لان كلا من J_e و J_h معلومان عند جميع النقاط في منطقة الاستنزاف ولذا فان :

$$J_{\text{total}} = J_e \Big|_{x'=0} + J_h \Big|_{x=0} = \left(\frac{qD_e n_{p0}}{L_e} + \frac{qD_h p_{n0}}{L_h}\right)(e^{qV/kT} - 1) \qquad (4\text{-}35)$$

وبما ان J_{total} يكون ثابت بالنسبة للموضع فانه من الممكن تكملة توزيع J_e و J_h على طول الثنائي كما موضح بالخطوط المتقطعة من الشكل 4.9(b) .
وان النتيجة النهائية لهذا التحليل هي القانون الثنائي المثالي :

$$I = I_0(e^{qV/kT} - 1) \qquad (4.36)$$

وما يهمنا في هذا الكتاب هو علاقة كثافة تيار الاشباع (Saturation current) :

$$\boxed{I_0 = A\left(\frac{qD_e n_i^2}{L_e N_A} + \frac{qD_h n_i^2}{L_h N_D}\right)} \qquad (4.37)$$

حيث A المقطع العرضي للثنائي

4.7 خصائص الثنائي المضاء ILLUMINATED CHARACTERISTICS

نحاول في هذه الفقرة دراسة خصائص ثنائي p-n المضاء لغرض تسهيل العمليات الرياضية فتفرض الحالة المثالية بحيث يكون توليد ازواج الالكترون فجوة بواسطة الضوء منتظماً خلال النبيطة . وهذه الحالة تشبه الحالة الفيزيائية المعينة التي عندها تكون الخلية مضاءة بضوء طويل الموجة وذي فوتونات بطاقة مقاربة لطاقة الفجوة المحظورة في شبه الموصل . ان امتصاص شبه الموصل لهذا الضوء يكون ضعيفا ومعدل توليد الازواج لوحدة الحجم يكون ثابتا على امتداد الابعاد التي يقطعها الضوء ولاتوجد هذه الحالة المثالية من معدل التوليد المنتظم

عند تحويل الطاقة الشمسية عملياً . وفي الفصول الاتية نعرض محاولات مختلفة لكثير من الحالات العملية .

مسألة : اشتق خصائص الفولتية ـ تيار المثالية الثنائي p-n عند اضاءته بضوء . ويكون معدل التوليد الحجمي لازواج الكترون ـ فجوة ثابتاً على امتداد النبيطة .

ان التحليل في هذه الحالة مشابه لحالة ثنائي في الظلام وهذا التشابه يجعلنا ان نحث القارىء على ان يحاول حل التمرين دون الرجوع الى الحل الموضح ادناه :

طريقة الحل : يجب ان يعلم القارىء اولاً ان التقريبات من رقم 1 الى رقم 4 والنتائج الوسطية الناتجة منها سارية المفعول بغض النظر عما اذا كانت النبيطة مضاءة ام لا . وهذه هي الحالة التي تكون فيها المعادلة 4.24 سارية المفعول ، غير ان G في هذه الحالة لاتساوي صفراً بل تساوي ثابتاً لذا فعلى جانب -n .

$$\frac{d^2 \Delta p}{dx^2} = \frac{\Delta p}{L_h^2} - \frac{G}{D_h} \qquad (4.38)$$

وبما ان G/D_h ثابت فان الحل العام لهذه المعادلة هو :

$$\Delta p = G\tau_h + Ce^{x/L_h} + De^{-x/L_h} \qquad (4.39)$$

وتبقى الشروط الحصرية بدون تغيير عن حالة الظلام ، وهذا يؤدي الى الحل التالي :

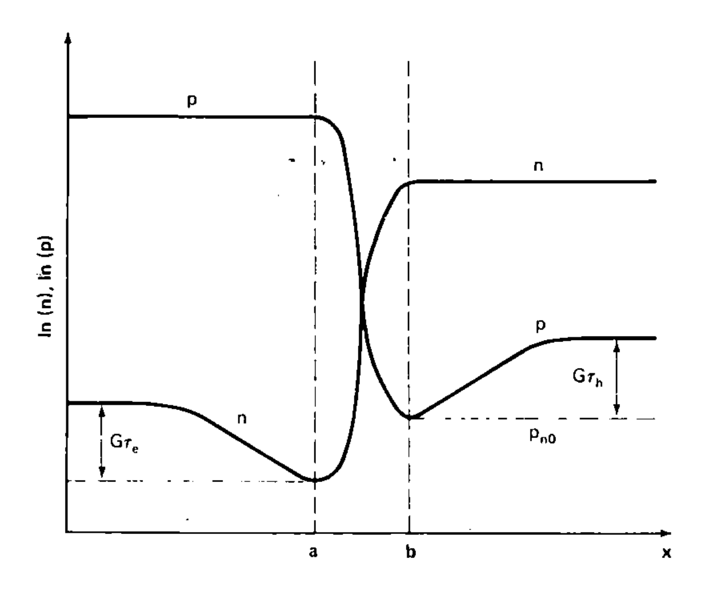
$$p_n(x) = p_{n0} + G\tau_h + [p_{n0}(e^{qV/kT} - 1) - G\tau_h]\, e^{-x/L_h} \qquad (4\text{-}40)$$

وهناك علاقة مشابه لـ $n_p(x')$ كما موضح في الشكل (4-10)

ان كثافة التيار المماثلة لهذا الحل تكون :

$$J_h(x) = \frac{qD_h p_{n0}}{L_h}(e^{qV/kT} - 1)e^{-x/L_h} - qGL_h e^{-x/L_h} \qquad (4.41)$$

مع علاقة مشابهة لـ $J_e(x')$.



الشكل (4.10) توزيع الحاملات خلال ثنائي القطب p-n عندما يكون ثنائي القطب دائرة قصيرة وبضاء بضوء تحت الحمراء (باعتبار معدل التوليد منتظماً خلال ثنائي القطب).

وباهمال تأثير اعادة الاتحاد مرة ثانية في منطقة الاستنزاف (تقريب 5) واعتبار تأثير التوليد في هذه المنطقة فان التغيير في كثافة التيار خلال هذه المنطقة يكون :

$$|\delta J_e| = |\delta J_h| = qGW \qquad (4-42)$$

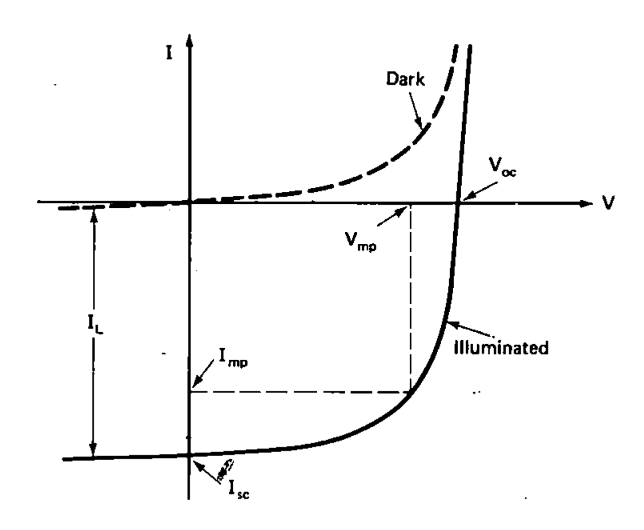
ولذا باتباع الخطوات السابقة نفسها في حالة الظلام يمكن الحصول على العلاقة الاتية للتيار والفولتية :

$$I = I_0\,(e^{qV/kT} - 1) - I_L \qquad (4-43)$$

حيث I_0 ناتج من المعادلة (4-37) اما I_L فيساوي :

$$I_L = qAG(L_e + W + L_h) \qquad (4-44)$$

وهذه النتيجة موضحة في الشكل 4.11 ونلاحظ من هذا الشكل ان خصائص الثنائي في الضوء هي نفسها في الظلام مع ازاحة في التيار نحو الاسفل مقدارها I_L . والازاحة تكون في الربع الرابع من هذا الشكل ويمكن استخراج القدرة الخارجة من الثنائي منها.



الشكل 4.11 خواص الخرج الثنائي القطب في الظلام وعندما يضاء

ومن الملاحظ ان صيغة المعادلة (44-4) توحي باستنتاج سيتحقق لاحقاً . فقيمة التيار المتولد ضوئياً تكون مساوية للقيمة المتوقعة اذا كانت جميع حاملات الشحنة المتولدة ضوئياً في منطقة الاستنزاف وضمن طول مسار الانتشار لحاملات الاقلية وعلى جانبي ثنائي فانها تسهم في التيار . ان منطقة الاستنزاف وكذلك سمك شبه الموصل الواقع ضمن مسار الانتشار على الجانبين تكون في الواقع منطقة التجميع (collection region) في الخلية الشمسية من نوع p-n .

4-8 معالم خرج الخلية الشمسية

SOLAR CELL OUTPUT PARAMETERS

تستخدم عادة ثلاث معالم (parameters) لدراسة ما مايخرج من الخلية الشمسية شكل (4.11) .

واحد هذه المعالم هو تيار الدائرة القصيرة (short circuit current) I_{sh} ويساوي التيار المتولد بواسطة الضوء عند الظروف المثالية . اما المعلم الثاني فهو فولتية الدائرة المفتوحة (open circuit voltage) ، V_{oc} ، ونجعل I يساوي صفراً في المعادلة (4-43) تكون القيمة المثالية لهذا المعلم :

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \qquad (4.45)$$

وتتحدد قيمة V_{oc} بخصائص شبه الموصل لاعتمادها على I_0 . والقدرة الخارجة عند اي نقطة العمل (Opereting point) في الربع الرابع تكون مساوية لمساحة المستطيل المحدد كما موضح في الشكل 4.11 . اما النقطة العاملة المعينة (I_{mp} و V_{mp}) تجعل هذه القدرة اكبر مايمكن . اما المعلم الثالث فهو عامل الملء Fill Factor (FF) ويعرف كمايلي :

$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} \qquad (4-46)$$

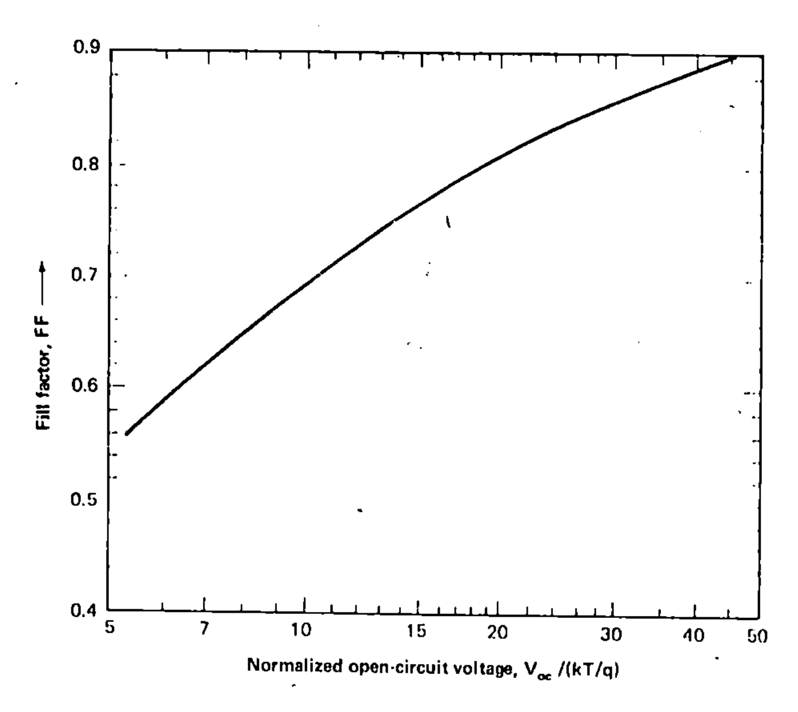
وهذا المعلم هو مقياس لمدى مربعية خصائص الخرج . وقيمته بالنسبة للخلايا ذات الكفاءة المقبولة تكون بين 0.7 و 0.85 . اما في الخلايا المثالية فيكون FF دالة لفولتية الدائرة المفتوحة V_{oc} فقط وبتحديد الفولتية المعيارية بـ v_{oc}, as $V_{oc}/(kT/q)$ فان القيمة المثالية (القصوى) لـ FF موضحة في الشكل 4.12 . فهناك معادلة تجريبية تعبر عن هذه العلاقة عندما تكون $v_{oc} > 10$ وبدقة اربعة مراتب عشرية (لاحظ الفقرة 5.44 ايضاً) :

$$FF = \frac{v_{oc} - \ln (v_{oc} + 0.72)}{v_{oc} + 1} \qquad (4.47)$$

اما كفاءة تحويل الطاقة η فيمكن التعبير عنها بالصيغة الآتية :

$$\eta = \frac{V_{mp} I_{mp}}{P_{in}} = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}} \qquad (4.48)$$

حيث P_{in} هي القدرة الكلية للضوء الداخل الى الخلية . ومعدل كفاءة تحويل الطاقة للخلايا الشمسية التجارية عادة تقع بين 12 الى **14%**



الشكل **4.12** القيمة المثالية لعامل الملء كدالة لفولتية الدائرة المفتوحة العيارية الى الفولتية الحرارية kT/q

4-9 تأثير الابعاد المحددة للخلية على I_0 :

EFFECT OF FINIET CELL DIMENSIONS ON I_0

ان تيار الاشباع I_0 لثنائي القطب هو الذي يحدد قيمة V_{oc} طبقاً للمعادلة (4-45) . وعند اشتقاق المعادلة (4-37) لايجاد I_0 فرض ضمنياً ان ثنائي القطب غير محدد الابعاد بالنسبة لجانبي المفرق وهذا لايمثل الواقع عملياً وان الخلية الشمسية محددة بابعاد معينة كما مبين في الشكل (4.13)

ان هذه المحدودية في الابعاد تغير من قيمة I_0 . وان هذا التغير في القيمة يعتمد على سرعة اعادة الاتحاد السطحية (فقرة 3.4.5) للسطوح المعرضة للضوء . وهناك حالتان محددتان (1) عندما تكون السرعة عالية جداً وتقترب من اللانهاية

(2) عندما تكون صغيرة جداً وتقترب من الصفر ، ففي الحالة الاولى تصبح زيادة تركيز حاملات الاقلية صفراً عند السطح ، اما في الحالة الثانية فان سريان تيار حاملات الاقلية الى السطح يكون صفراً ، وبتطبيق هاتين الحالتين كشروط حدودية يمكننا وضع العلاقة الجديدة لـ I_0 بالشكل الاتي :

$$I_0 = A\left(\frac{qD_e n_i^2}{L_e N_A} * F_P + \frac{qD_h n_i^2}{L_h N_D} * F_N\right) \qquad (4.49)$$

واذا كانت سرعة اعادة الاتحاد السطحية عالية لجانب نوع -p في النبيطة فان F_p تأخذ الصيغة الاتية :

$$F_P' = \coth\left(\frac{W_P}{L_e}\right) \qquad (4.50)$$

حيث W_P يتضح من الشكل 14.3 . ويكون هناك تغيير مناظر لـ F_N عندما يكون السطح المناظر سطحاً ذو سرعة اعادة الاتحاد عالية . عندما يكون السطح ذا سرعة اعادة الاتحاد واطئة ليكون F_N بالصيغة الاتية :

$$F_N = \tanh\left(\frac{W_N}{L_h}\right) \qquad (4.51)$$

---

(1) العلاقات العامة لايجاد F_n و F_p (المرجع 4.3) هي :

$$F_N = \frac{S_h \cosh(W_N/L_h) + D_h/L_h \sinh(W_N/L_h)}{D_h/L_h \cosh(W_N/L_h) + S_h \cdot \sinh(W_N/L_h)}$$

$$F_P = \frac{S_e \cosh(W_P/L_e) + D_e/L_e \sinh(W_P/L_e)}{D_e/L_e \cosh(W_P/L_e) + S_e \sinh(W_P/L_e)}$$

حيث S_e و S_p يمثلان سرعة اعادة الاتحاد الوسطي للسطوح المتتالية كما موضحة في الفقرة 3.4.5 .

ويمكن استخدام تعبير مشابه F_P عندما يكون سطح منطقة -p بسرعة الاتحاد واطئة . وجدير بالملاحظة يمكن الحصول على اصغر قيمة لـ I_o وبذلك اكبر قيمة لـ V_{oc} عندما تكون سرعة اعادة الاتحاد للسطحين واطئة .

4-10 الخلاصة SUMMARY

بواسطة سلسلة من التقريبات يمكن اختصار المعادلات الخاصة بوصف عمل الخلية الشمسية الى صيغ قابلة للاستخدام . وهذا يساعد على ايجاد الشكل المثالي لخصائص الظلامية والمضاءة للخلايا الشمسية .

ان منحنيات التيار ـ فولتيه (I–V) المثالية تكون متناظرة في الظلام والضوء الا ان هذه المنحنيات تتزحزح نحو الاسفل في حالة الاضاءة وبمقدار التيار المتولد ضوئياً (I_L) . والمنطقة الفعالة لجمع التيار المتولد ضوئياً هي منطقة الاستنزاف عند المفرق وكذلك مادة الخلية الواقعة ضمن مسار الانتشار لحاملات الاقلية .

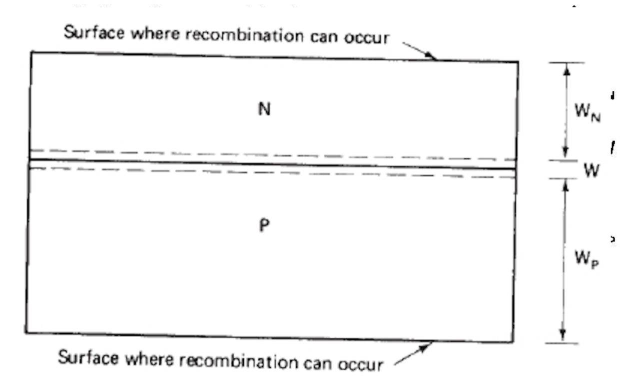
ان المعالم المستعملة لايجاد ما يخرج من الخلية الشمسية هي :
تيار الدائرة القصيرة I_{sh} وفولتية الدائرة المفتوحة V_{oc} والعامل الملء FF. والظروف السطحية للخلية الشمسية لها اهمية محدودة تؤثر على فولتية الدائرة المفتوحة V_{oc} . وفي الفصول الاتية توضح اهمية هذا التأثير على تيار الدائرة القصيرة I_{sh}.

تمارين

4.1 ثنائي مفرق p-n مطعم بصورة منتظمة وبـ 10^{24} شائبة/ م^3 على جانب نوع P- و 10^{22} شائبة على جانب نوع n- عند درجة حرارة 300 كلفن ، احسب اعلى شدة للمجال الكهربائي عرض منطقة الاستنزاف وسعة المفرق لوحدة المساحة عند (a) الانحياز الصفري (b) الانحياز الامامي 0.4 فولت (c) 10 فولت الانحياز العكسي .

4.2 يفرض اشتقاق المذكور الفقرة (44) ان يكون في مناطق شبه معتدلة تركيز حاملات الاقلية اقل من تركيز حاملات الاغلبية . اوجد صيغة رياضية لاقصى فولتية مسلطة يجب تصبح عندها تلك الفرضية

4.3 (a) اذا لديك خلية بابعاد محدودة كما مبين في الشكل (4.13) اشتق علاقات لايجاد كثافة الالكترونات من جانب نوع p- في الظلام كدالة للفولتية المسلطة في حالتي الحدية حينما تكون سرعة اعادة الاتحاد للسطح الخلفي .وعندما تكون واطئة . ثم ارسم وقارن هذه التوزيعات عندما يكون عرض منطقة P اقل بكثير من طول الانتشار لحاملات الاقلية .



الشكل 4.13 الخلية الشمسية تبين فيها الابعاد المهمة

(b) بالاستعانة بهذا الرسم بين اي من التوزيعين اقل اسهاماً في تيار الاشباع I_0 للثنائي واكبر فولتية الدائرة لمفتوحة V_{oc} تحت الاضاءة . اذا بقيت جميع معالم الاخرى ثابتة .

4.4 هذا مثال اضافي اخر حول الطريقة التحليلية المتبعة في هذا الكتاب والتي لاتحتاج الى رياضيات كثيرة . افرض خلية بابعاد محدودة واقل بكثير من طول الانتشار لحاملات الاقلية المتناظرة ، اذا اعتبرت سرعة اعادة الاتحاد للسطحين الخلفي والامامي عالية جداً (اللانهاية) ففي هذه الحالة يكون التقريب الجيد هو اهمال اعادة الاتحاد داخل المادة مقارنة باعادة الاتحاد عند السطح (اي انه يمكن افتراض معدل اعادة الاتحاد U يساوي صفراً) اوجد علاقة لكثافة تيار الاشباع لهذا الثنائي وكذلك اوجد تيار الدائرة القصيرة عندما يكون معدل التوليد للازواج الكترون ـ فجوة (G) بواسطة الضوء ثابتاً على طول الخلية .

4.5 خلية سليكونية عند درجة حرارة 300 كلفن وبمساحة 100 سم٢ ومضاءة بـ 1-kW/m^2 تعطى فولتية الدائرة المفتوحة 600 ملي فولت وتيار الدائرة القصيرة 3.3 امبير بفرض ان الخلية تعمل بشكل مثالي فما كفاءتها التحويلية عند نقطة القدرة القصوى ؟

REFERENCES

المراجع

[4.1] A. S. Grove, *Physics and Technology of Semiconductor Devices* (New York: Wiley, 1967), p. 158.

[4.2] Ibid., pp. 169-172.

[4.3] J. P. McKelvey, *Solid State and Semiconductor Physics* (New York: Harper & Row, 1966), p. 422.

الفصل
الخامس

حدود الكفاءة والخسائر واجراء القياسات

STANDARD SILICON SOLAR CELL TECHNOLOGY

5.1 المقدمة INTRODUCTION

ان الضوء الساقط على الخلية الشمسية يولد ازواج الكترون ـ فجوة في مادة شبه الموصل المصنوع منه الخلية . وان التركيب الالكتروني غير المتناظر الموجود في الخلية يسبب فصل هذه الالكترونات والفجوات وخلق سيل من الالكترونات في الحمل المربوط بين طرفي الخلية . وهذا الفصل مخصص لمناقشة حدود الكفاءة لعملية تحويل الطاقة وتأثير الظروف المختلفة على الكفاءة ويهتم ايضاً بوصف التقنيات المستخدمة في قياس، كفاءة النبائط الفوتوفولطائية .

5.2 حدود الكفاءة EFFICIENCY LIMITS

5.2.1 فكرة عامة General

لاحظنا في الفصل الرابع ان هناك ثلاثة متغيرات تستخدم لدراسة اداء الخلية الشمسية من نوع p–n وهي فولتية الدائرة المفتوحة (V_{oc})، وتيار الدائرة القصيرة (I_{sc}) ، وعامل الملء (FF) (شكل 4.11) كما تبين ان الحد الاعلى لعامل الملء هو دالة لـ V_{oc} . ونحاول الآن اختيار الحدود المثالية لكل من I_{sc} و V_{oc} .

5.2.2 تيار الدائرة القصيرة Short–Circuit Current

من السهل نسبياً ايجاد الحد الاعلى لتيار الدائرة القصيرة المتولد من مادة الخلية الشمسية ، حيث ان كل فوتون يسقط على الخلية وبطاقة اكبر من طاقة الفجوة

المحظورة للمادة ، عند الظروف المثالية يولد[1] الكتروناً واحداً في الدائرة الخارجية وعند حساب الحد الاعلى لـ I_{sc} يجب معرفة فيض الفوتونات في ضوء الشمس . وهذا يمكن حسابه من توزيع الطاقة للضوء الشمسي (الفصل الاول) وذلك بتقسيم طاقة طول موجي معين على طاقة الفوتون الواحد $(hf \text{ or } hc/\lambda)$ عند الطول الموجي نفسه . ونتائج مثل هذه الحسابات موضحة في الشكل (a) 5.1 كل من اشعاع AM0 والاشعاع القياسي AM1.5 المستخدم على الارض المعرفين في الفصل الأول .

يمكن ايجاد قيمة التيار الدائرة القصيرة I_{sc} بتكامل هذه التوزيعات من ادنى الى أعلى طول موجي والتي عندها تتولد ازواج الكترون ـ فجوة لشبه الموصل المعطى . [العلاقة بين طاقة الفوتون بالاليكترون فولت ، وطول الموجي بالمايكرون والتي تستحق الحفظ هي $E\ (\text{eV})=1.24/\lambda\ (\mu\text{m})$ المحظورة للسليكون تساوي 1.1 الكترون فولت تقريباً ولذلك فإن الطول الموجي المائل لها هو 1.13 مايكرون] . والحدود العليا الناتجة من تيار الدائرة القصيرة موضحة في الشكل 5.1(b) .

وليس من الغريب ان كلما قل عرض الفجوة المحظورة فإن كثافة تيار الدائرة القصيرة تزداد . وذلك لان كثيراً من الفوتونات تملك طاقة كافية لخلق زوج الكترون ـ فجوة عندما تكون الفجوة المحظورة أقل بكثير من طاقتها .

5.2.3 فولتية الدائرة المفتوحة والكفاءة Open-Circuit Voltage and Efficiency

لم تعرف التحديدات الاساسية لفولتية الدائرة المفتوحة في الخلايا الشمسية بشكل واضح وقد تبين في الفصل الرابع أن V_{oc} للخلية p-n المثالية تساوي .

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \qquad (5.1)$$

---

(1) يمكن للفوتونات ذات الطاقة العالية أي عدة مرات اكبر من طاقة الفجوة المحظورة ان تولد زوج الكترون ـ فجوة بحيث يملك الالكترون الناتج طاقة اعلى من حافة حزمة التوصيل وتولد زوج الكترون ـ فجوة آخر بعملية التأين التصادمي (impact ionzation) (فقرة 3.4.3) . في ضوء الشمس لا يوجد عدد كبير من هذا النوع من الفوتونات ولهذا تعتبر هذه الآلية غير مهمة في الخلايا الشمسية .

حيث I_L هو التيار المتولد ضوئياً و I_0 هو تيار الاشباع للثنائي ويمكن تمثيله بالمعادلة التالية

$$I_0 = A\left(\frac{qD_e n_i^2}{L_e N_A} + \frac{qD_h n_i^2}{L_h N_D}\right) \qquad (5.2)$$

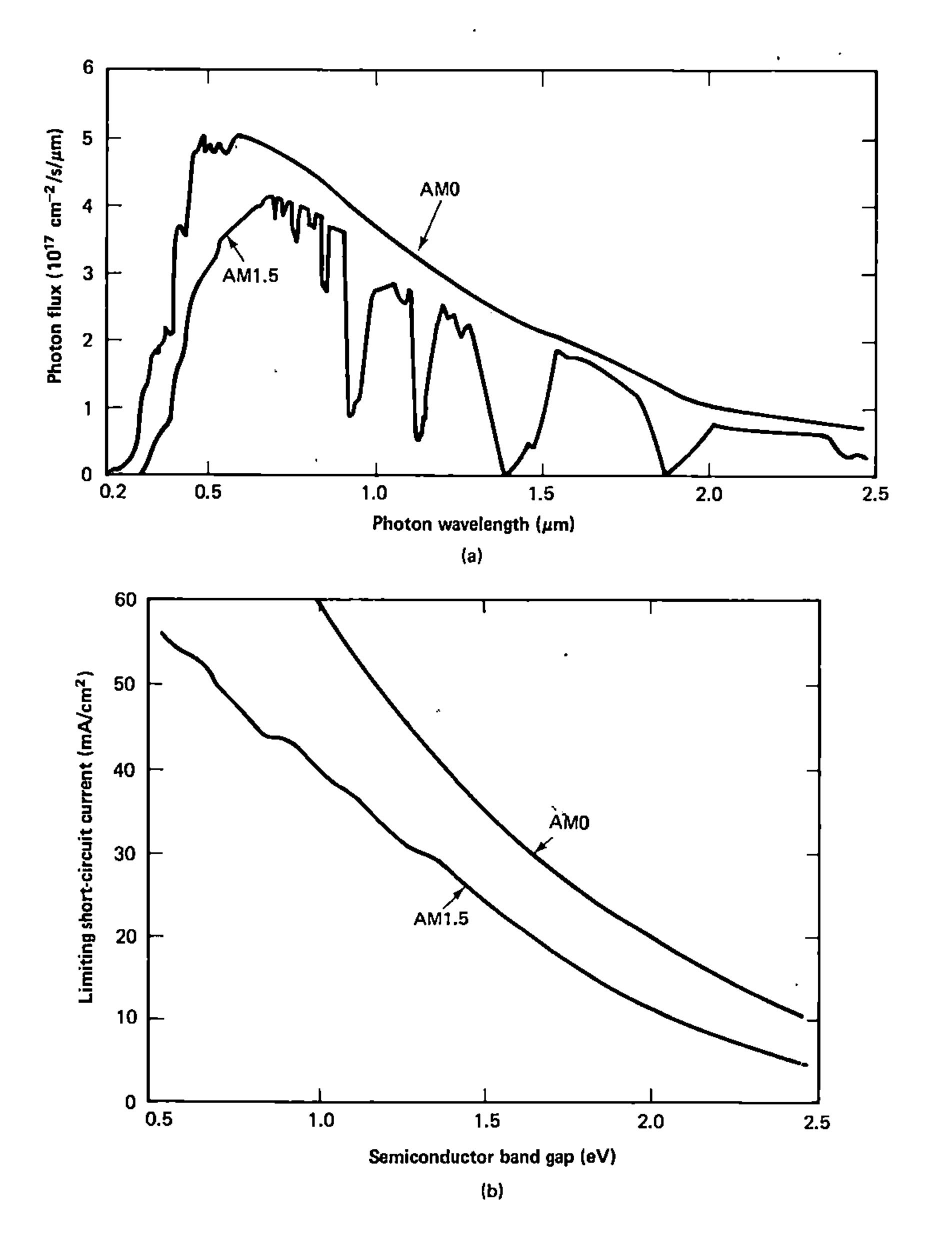
وللحصول على اعلى قيمة لـ V_{oc} يجب ان يكون I_0 اصغر مايمكن . لحساب الحد الاعلى لـ V_{oc} (اي اعلى كفاءة) علينا ان نرجع الى اختيار القيم النموذجية لعناصر شبه الموصل في المعادلة (5.2) مع بقاء ضمن المدى المسموح لانتاج خلايا شمسية جيدة (مرجع 5.1) بالنسبة للسليكون فهذا يعطي الحد الاعلى للفولتية V_{oc} يساوي 700 ملّي فولت واعلى قيمة لعامل الملء المناظر لها هو 0.84 ويمكن ربط هذه النتائج مع نتائج I_{sc} المذكورة في الفقرة السابقة لايجاد اقصى قيمة لكفاءة التحويل ان العنصر الموجود في المعادلة 5.2 والذي يعتمد على اختيار شبه الموصل هو مربع التركيز الذاتي للحاملات ، n_i^2 وفي الفصل الثاني وجدنا ان

$$n_i^2 = N_C N_V \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \qquad (5.3)$$

وان التقدير المقبول لأدنى كثافة لتيار الاشباع كدالة للفجوة المحظورة من المعادلة 5.2 هو

$$I_0 = 1.5 \times 10^5 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \quad \text{A/cm}^2 \qquad (5.4)$$

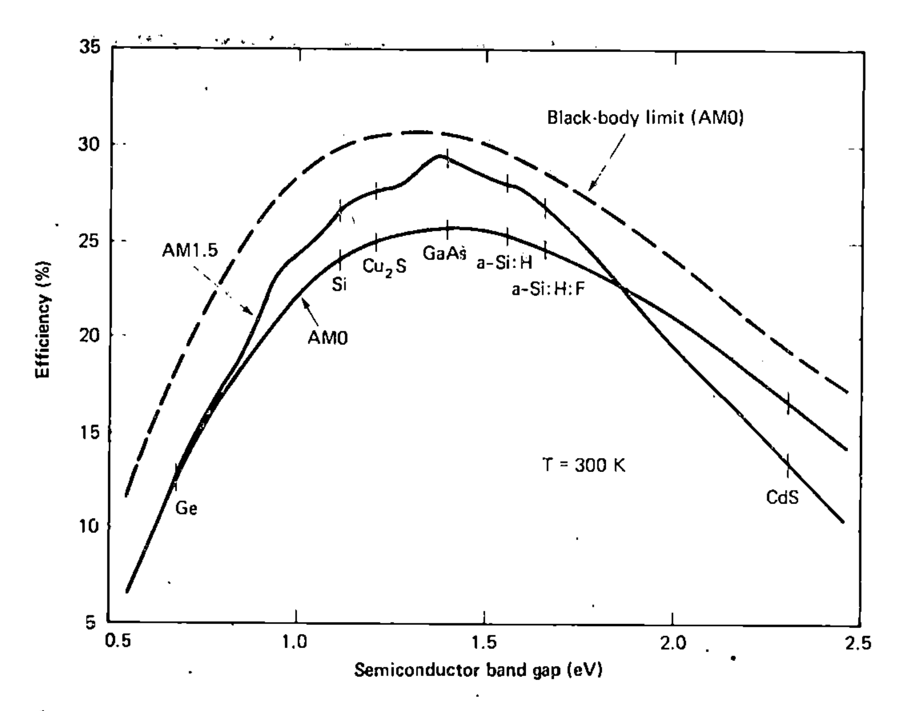
وهذه العلاقة تبين أن اعلى قيمة للفولتية V_{oc} تتناقص مع تناقص الفجوة المحظورة . وإن هذا الاتجاه هو عكس حالة تيار الدائرة القصيرة I_{sc} ومن هذا يتبين ان هناك فجوة محظورة مثلى للحصول على اعلى قيمة للكفاءة .



الشكل 5.1 (a)فيض الفوتونات في ضوء الشمس المناظر للتوزيع الطيفي . AM0 وAM1.5 المغطى في الشكل 1.3

(b) الحدود العليا لكثافة تيار الدائرة القصيرة المناظر كدالة لطاقة الفجوة المحظورة لمواد الخلايا الشمسية .

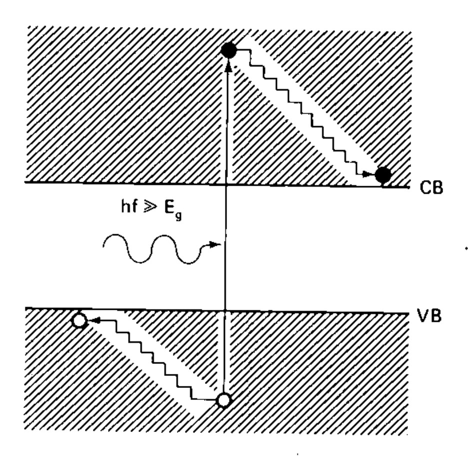
يبين الشكل (5.2) اعلى كفاءة لتحويل الطاقة كدالة للفجوة المحظورة . وتحدث ذروة الكفاءة عند الفجوة المحظورة الواقعة بين 1.4 و 1.6 الكترون فولت . وترتفع من 26% الى 29% عندما تزيد كتلة الهواء (air mass) من AM الى AM1.5. ولو ان الفجوة المحظورة للسليكون أقل من الفجوة المثالية ولا تزال ذروة الكفاءة لهذه المادة عالية نسبياً . ان شبه الموصل GaAs له فجوة محظورة مثالية قريبة من 1.4 الكترون فولت .



الشكل 5.2 حدود الكفاءة كدالة للفجوة المحظورة عادة الخلية . ان الخطوط المستمرة تمثل حدوداً تجريبية للاضاءة بـ AM0 و AM 1.5 أما الخطوط المتقطعة مبنية على حركية الحرارة لخلايا الجسم الاسود تحت اشعاع AM0 .

السبب الرئيس للكفاءة القصوى الواطئة نسبياً هو ان كل فوتون ممتص يولد زوج الكترون ـ فجوة فقط بصرف النظر عن طاقته ويسترخي الكترون ـ فجوة بسرعة الى حافتي الحزم باعثاً الفوتونات (الشكل 5.3) . حتى ولو كانت طاقة الفوتونات اكبر بكثير من الفجوة المحظورة فان الالكترون والفجوة الناتجة فعلياً يتم فصلها بطاقة تساوي طاقة الفجوة المحظورة فقط . وهذه العملية تحدد اعلى كفاءة

يمكن الحصول عليها حيث تكون بحدود 44% (مرجع 5.2). والمد الرئيس الآخر ، حتى وان كانت حاملات الشحنة تنفصل بواسطة جهد يساوي طاقة الفجوة المحظورة ، فهو القابلية الفطرية لتوليد فولتية تساوي جزءاً من هذا الجهد . وكمثال على ذلك في حالة السليكون اعلى قيمة لهذا الجزء يساوي 60% = ≈ 0.7/1.1



الشكل (5.3)يبين زوج الكترون ـ فجوة المتولد بواسطة فوتونات ذات طاقة عالية يسترخيان الى حافات الحزم الخاصة بالحاملات والطاقة المهدورة تتبدد على شكل حرارة . وهذه احدى الآليات الرئيسة للفقد في الخلية .

ان المناقشة المذكورة اعلاه تختص بحالة الخلية المنفردة والمعرضة بصورة مباشرة الى ضوء الشمس . ومن الناحية العملية وصلت كفاءة الخلايا المصنوعة شبه الموصل GaAs أكثر من 20% . ويتم فيما بعد شرح تقنيات اخرى تودي الى زيادة كفاءة مثل هذه المنظومات الفوتوفولطائية اكثر من ذلك . وقد تم تسجيل كفاءة مقدارها 28.5% عام 1978 من منظومة فوتوفولطائية مكونة من خلايا متضاعفة . وعلى الرغم من هذه القيم الواطئة للكفاءة القصوى يبقى استخدام الخلايا الشمسية اكفأ طريقة لتحويل الطاقة الشمسية الى طاقة كهربائية .

5.2.4. حدود الكفاءة لخلايا الجسم الاسود

Efficiency Limits for Black-body Cells

ان التقيدات الموجودة في المحاولة السابقة لحساب اعلى $V_{o.c.}$ تعتمد على الطبيعة التجريبية وهناك احتمالية ضعيفة في تغيير تقنية المواد وتركيب الخلية الشمسية للحصول على كفاءة اعلى من الحدود الموجودة في الشكل 5.1 . ولقد ظهرت محاولة

جيدة اخرى في مرجع 5.2 لحالة خلية الجسم الاسود الشمسية . فان مثل هذا الجسم يمتص جميع الاشعاع الساقط عليه ويتوقع ظاهرياً ان تكون الكفاءة لهذه الخلية اعلى من كفاءة الخلايا الاخرى .

تبعث الاجسام السوداء الإشعاع بتوزيع طيفي يعتمد على درجة حرارة الاجسام (راجع فصل الاول) . ولذا فان خلية الجسم الاسود الشمسية عند حالة التوازن الحراري تبعث فوتونات وتكون طاقة هذه الفوتونات اعلى من الفجوة المحظورة . وتتكون هذه الفوتونات نتيجة اعادة الاتحاد الاشعاعي . حيث يكون معدل اعادة الاتحاد الاشعاعي مساوياً لمعدل التوليد عند التوازن الحراري وعندما يكون حد معدل اعادة الاتحاد اوطأ مما هو في حالة التوازن الحراري . تبعث الخلية عدداً من الفوتونات لوحدة الزمن وبطاقات اعلى من طاقة الفجوة المحظورة . وعندما تكون الخلية ذات سرعة واطئة فان معدل اعادة الاتحاد يزداد أسياً مع الانحياز المسلط . وهذا يؤدي الى معادلة مماثلة لمعادلة الثنائي المثالي الذي تم شرحه كخلية شمسية في حالة الظلام بقيمة I_o مساوية لشحنة الالكترون مضروبة بمعدل اعادة الاتحاد خلال الخلية .

وباجراء حسابات مناسبة لمادة السليكون يمكن الحصول على ادنى قيمة للتيار I_o والذي يناظر اعلى قيمة محتملة لـ V_{oc} وتساوي تقريباً 850 مليّ فولت لخلية الجسم الاسود السليكوني الشمسية . ونتائج الحسابات للفجوات المحظورة المختلفة لاشباه الموصلات مبينة بالمنحني المتقطع في الشكل (5.2) ، وكما يبين ان الحد الاعلى للكفاءة لخلية مفردة معرضة بصورة مباشرة للضوء اكثر من 30% .

5.3 تأثير درجة الحرارة EFFECT OF TEMPERATURE

بما ان درجة حرارة الخلايا الشمسية في الحقل تختلف اختلافاً كبيراً خلال النهار . فمن الضروري فهم ومعرفة تأثير درجة الحرارة على ادائها . وان تيار الدائرة القصيرة للخلايا الشمسية لايعتمد بدرجة كبيرة على درجة الحرارة . اذ يتزايد التيار وبدرجة طفيفة عند زيادة درجة الحرارة ويرجع ذلك الى زيادة امتصاص الضوء بسبب تناقص الفجوة المحظورة الناتج عن زيادة درجة الحرارة . اما فولتية الدائرة المفتوحة وعامل الملء فيتناقصان عند زيادة درجة الحرارة .

العلاقة بين تيار الدائرة القصيرة وفولتية الدائرة المفتوحة هي :

$$I_{sc} = I_0(e^{qV_{oc}/kT} - 1) \qquad (5.5)$$

وبحذف الحد السالب الصغير تصبح المعادلة بالشكل الآتي : ــ

$$I_{sc} = AT^{\gamma} e^{-E_{g0}/kT} e^{qV_{oc}/kT} \qquad (5.6)$$

حيث لايعتمد A على درجة الحرارة و E_{go} هي الفجوة المحظورة للشبه الموصل المستخدم الصفر المطلق وتتضمن γ اعتمادية العناصر الاخرى التي تقرر I_0 على درجة الحرارة وتقع قيمة γ بين 1 الى 4 كمعدل . وبتفاضل المعادلة الاخيرة مع جعل $V_{g0} = E_{g0}/q$ يكون لدينا :

$$\frac{dI_{sc}}{dT} = A\gamma T^{\gamma-1} e^{q(V_{oc}-V_{g0})/kT} + AT^{\gamma}\left(\frac{q}{kT}\right)\left[\frac{dV_{oc}}{dT} - \left(\frac{V_{oc}-V_{g0}}{T}\right)\right] e^{q(V_{oc}-V_{g0})/kT} \qquad (5.7)$$

باهمال dI_{sc}/dT بالمقارنة مع حدود اكثر اهمية تصبح النتيجة

$$\boxed{\frac{dV_{oc}}{dT} = -\frac{V_{g0} - V_{oc} + \gamma(kT/q)}{T}} \qquad (5.8)$$

ومن هذه النتيجة يتبين ان V_{oc} تتناقص تقريباً بشكل خطي مع زيادة درجة الحرارة . وبتمويض القيم الخاصة بمادة السليكون ($V_{go} = 1.2\,eV$ و 0.6 فولت و V_{oc} و 3 γ و $T = 300\,k$) تصبح

$$\frac{dV_{oc}}{dT} = -\frac{1.2 - 0.6 + 0.078}{300} \quad V/^{\circ}C \qquad (5.9)$$

$$= -2.3 \quad mV/^{\circ}C \qquad (5.10)$$

وهذه النتيجة تتفق بصورة جيدة مع النتائج التجريبية.[2] ولذا فان V_{oc} تقل بحدود 0.4% لكل درجة مئوية . ويعتمد عامل الملء على الفولتية التي تمت معايرتها الى kT/q وبذلك يتناقص عامل الملء ايضاً مع درجة الحرارة .

ويظهر من هذا ان التأثير المهم يكون على V_{oc} وهذا يؤدي الى خفض القدرة الخارجة والكفاءة عند زيادة درجة الحرارة . فان القدرة الخارجة من الخلية السليكونية تقل بمقدار 0.4% الى 0.5% لكل درجة مئوية . ويقل هذا النقصان في اشباه الموصلات ذات الفجوات المحظورة الكبيرة فمثلاً تتأثر خلايا GaAs نصف تأثير الخلايا السليكونية فقط .

5.4 الخسائر في الكفاءة EFFICIENCY LOSSES

5.4.1 فكرة عامة General

ان الشكل 5.4 يبين مقطعاً عرضياً لخلية شمسية حقيقية من نوع p-n فان كفاءة الخلية الحقيقية عادة تكون اقل من الحدود المثالية التي تمت مناقشتها اعلاه ويعود سبب ذلك الى خسائر مختلفة وفي الفصول القادمة نوضح كيفية تصميم الخلايا الشمسية لتكون احسن كفاءة بخفض الخسائر الناتجة من الاليات التي توضح في الفقرات القادمة.

5.4.2 الخسائر في تيار الدائرة القصيرة Short-Circuit Current Losses

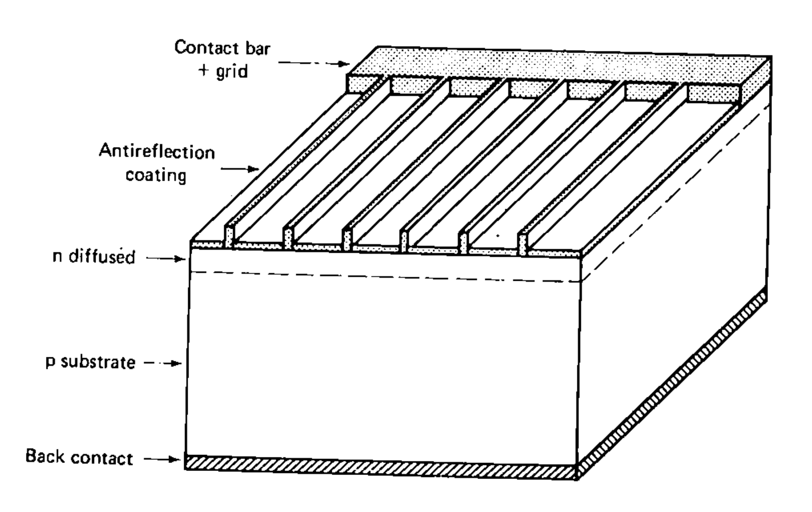
يوجد ثلاثة انواع من الخسارة في الخلايا الشمسية والتي يمكن ان يقال بانها ناتجة من الخاصية البصرية للمادة وهي :

1- في الفقرة 3.2 وجدنا ان سطح السليكون عاكس لقسم كبير من الضوء الساقط عليه وعند طلاءه بغشاء غير عاكس (antireflection) كما في الشكل (5.4) ، تقل نسبة الخسارة بمقدار 10% .

2- ان ضرورة عمل الاقطاب المعدنية لكل من جانبي نوع -n ونوع -p ينتج شبكة معدنية على سطح الخلية المعرض لضوء الشمس وهذا التركيب المعدني يمنع 5 الى 15% من الضوء الساقط من الدخول الى الخلية .

---

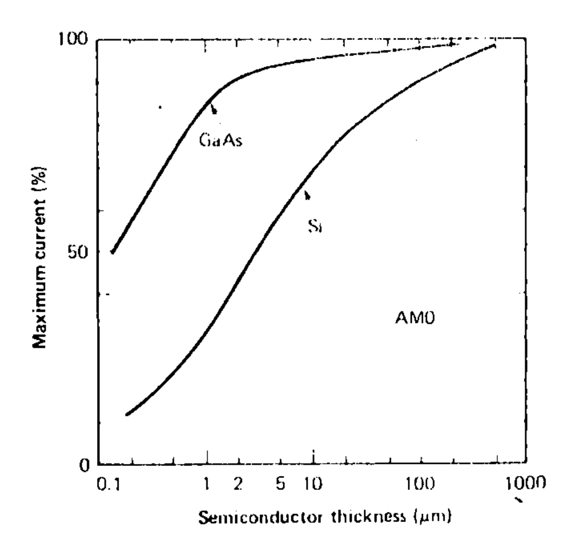
(2) وهذا يرجع بصورة عامة الى حقيقة ان الشكل (5.8) يمكن تطبيقه في حالات اعم من المعادلات المشتقة هنا .



الشكل 5.4 يبين السمات الرئيسة للخلية الشمسية . الابعاد باتجاه عمودي مكبرة بشكل على غير حقيقته مقارنة بالابعاد العرضية لغرض التوضيح

3- واخيراً اذا كان سمك الخلية غير كاف فان بعض فوتونات الضوء التي تملك طاقة معينة لاتتفاعل مع المادة وتستطيع النفاذ مباشرة الى الخارج وهذا يحدد اقل سمك مطلوب من مادة شبه الموصل لصناعة الخلية . وان اشباه الموصلات ذات الفجوة غير المباشرة عادة تحتاج الى سمك اكثر من ذات الفجوة المباشرة كما مبين في النتائج المحسوبة لكل من السليكون و GaAs في الشكل 5.5 .

وهناك سبب اخر للخسارة في تيار الدائرة القصيرة وهو عملية اعادة الاتحاد في المادة وسطوح شبه الموصل ولقد بينا في الفصل الرابع ان ازواج الكترون – فجوة المتولدة قرب المفرق تسهم نفسها في I_{sc} ، وتملك الحاملات المتولدة بعيداً عن منطقة المفرق إحتمالية كبيرة للرجوع والاتحاد قبل ان تكمل الحركة من نقطة التوليد الى قطبي النبيطة .



الشكل 5.5 تأثير سمك الخلية على النسبة المئوية لاعلى تيار متوقع توليده من الخلية الشمسية . لاحظ الفرق بين شبه الموصل ذي الفجوة المباشرة (GaAs) وذي فجوة غير مباشرة (Si) .

5.4.3 الخسائر في فولتية الدائرة المفتوحة :
Open-Circuit Voltage Losses

ان العملية الاساسية التي تحدد قيم V_{oc} هي عملية اعادة الاتحاد في شبه الموصل وتم توضيح ذلك في محاولة حساب الفولتية V_{oc} في الفقرة 5.2.4 فان اوطأ اعادة الاتحاد في شبه الموصل يعني اعلى فولتية V_{oc} وان عمليتي اعادة الاتحاد داخل المادة وسطحها تكونان مهمتين .

ان احد العوامل المهمة التي تحدد من قيمة V_{oc} هو اعادة الاتحاد خلال مستويات القنص في منطقة الاستنزاف . ويكون هذا النوع من اعادة الاتحاد فعال في مثل هذه المناطق . وبالرجوع الى العلاقة الرياضية لهذه العملية (الفصل الثالث) نحصل على :

$$U = \frac{np - n_i^2}{\tau_{h0}(n + n_1) + \tau_{e0}(p + p_1)} \qquad (5.11)$$

ويكون U عند ذروته عندما يكون كل من n_1 و p_1 وكذلك n و p صغير ويتحقق هذان الشرطان عندما يقع القنص قريب الفجوة المحظورة ضمن منطقة الاستنزاف . وعند تحليل خصائص ثنائي القطب p-n ، في الفصل الرابع لحالة الظلام أهملت عملية اعادة الاتحاد في مناطق الاستنزاف بفرض ان عرض هذه المنطقة (W) صغير جداً تقريب 5 على اية حال ، فان اهمية اعادة الاتحاد في هذه المنطقة قد تكون كبيرة في بعض الحالات .

ان اضافة عملية اعادة الاتحاد في منطقة الاستنزاف الى خصائص ثنائي p-n في الظلام تزيد حداً اخر الى خصائص التيار – فولتية وتكون المعادلة النهائية بالشكل الاتي

$$I = I_0(e^{qV/kT} - 1) + I_W(e^{qV/2kT} - 1) \qquad (5.12)$$

وعندما تكون I_0 نفس القيمة السابقة ولـ : I_W قيمة (مرجع 4.5) :

$$I_W = \frac{qAn_i\pi}{2\sqrt{\tau_{e0}\tau_{h0}}} \frac{kT}{q\xi_{max}} \qquad (5.13)$$

حيث ξ_{max} هي شدة المجال الكهربائي الاعلى في المفرق وقيمته معطاة بالمعادلة (4.4) في مفرق مطعم بصورة منتظمة على جانبيه .

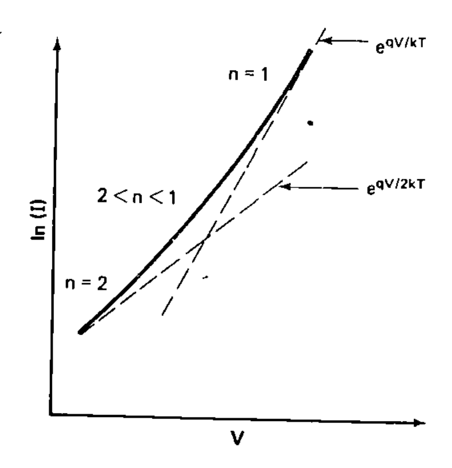
هذه الخصائص مخططة على ورقة بيانية شبه لوغارتمية (Semilogritmic) في الشكل 5.6 ويكون الحد الثاني من المعادلة (5.12) سائداً عند التيارات الواطئة بينما الحد الاول هو السائد عند التيارات العالية .

ومن الممكن كتابة المعادلة 5.12 بالشكل الاتي :

$$I = I'_0(e^{qV/nkT} - 1) \qquad (5.14)$$

ويعرف n بعامل المثالية (ideality facetor) ويتغير مع مستوى التيار كما يعمل I_0 من المعادلة (5.12) وتتناقص n من 2 عند التيارات الواطئة الى 1 عند التيارات العالية (3) . وبما ان خصائص ثنائي p-n في الضوء هي نفس الخصائص

3- يمكن الحصول على منطقة اخرى تكون فيها n = 2 مرة ثانية عندما يكون التيار عالي ويحدث ذلك عندما يقترب تركيز حاملات الاقلية من تركيز حاملات الاغلبية في المناطق نفسها من النبيطة (device) .



الشكل **5.6** تخطيط شبه لوغارتيمي لخصائص تيار ـ فولتية لمفرق **p-n** متضمنا تأثير اعادة الاتحاد في منطقة الاستنزاف .

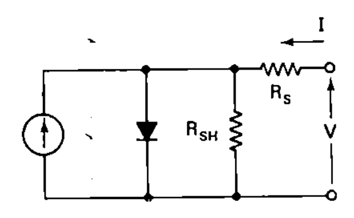
في الظلام كما موضح في الشكل 5.6 مع الازاحة نحو الاسفل في الربع الرابع ومن الممكن ان تلاحظ ان اضاف اعادة الاتحاد في منطقة الاستنزاف تعمل على تناقص قيمة V_{oc} كما يتبين في الفصول القادمة .

5.4.4 الخسائر في عامل الملء **Fill Factor Losses**

ان عملية اعادة الاتحاد في منطقة الاستنزاف تقلل ايضاً من قيمة عامل الملء (Fill factor) اذا كان عامل المثالية n المحسوب في الفقرة السابقة اكبر من واحد ، فإن قيمة العامل الملء المثالي المحسوب (شكل **4.12**) تكون عند فولتية V_{oc}/n . وتكون أقل من ذلك عندما يكون n يساوي واحداً . وبتعريف الفولتية المعيارية (normalized) v_{oc} بـ $V_{oc}/(nkT/q)$ بصورة عامة فإن العلاقة التجريبية للعامل الملء المذكورة في الفصل الرابع تبقى سارية المفعول مع دقة لاربعة مراتب عشرية تقريباً لـ $10 < v_{oc}$

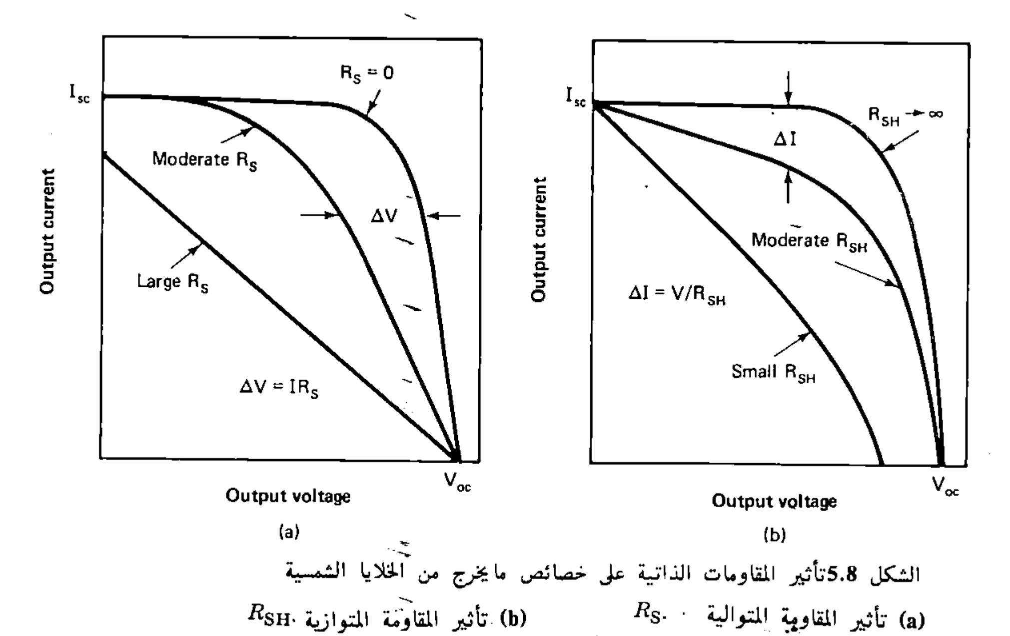
$$FF_0 = \frac{v_{oc} - \ln (v_{oc} + 0.72)}{v_{oc} + 1} \qquad (5.15)$$

الخلايا الشمسية عامة تملك مقاومة متوالية ذاتية وأخرى متوازية مترابطة معها ويبين الشكل 5.7 الدائرة المكافئة للخلية الشمسية . فهناك عدة آليات فيزيائية



الشكل 5.7 الدائرة المكافئة للخلية الشمسية

مسؤولة عن هذه المقاومات . والمصادر الرئيسة للمقاومة المتوالية R_S هي المقاومة الذاتية لنسبة الموصل المصنوعة منه الخلية ومقاومة الموصلات المعدنية والتوصيلات الكهربائية البينية (interconnections) وكذلك مقاومات الوصل (contact resistance) بين المعدن وشبه الموصل . اما المقاومة المتوازية (shunt rsistance) (R_{SH}) فتحدث نتيجة تسرب التيار خلال مفرق p-n حول حافة الخلية . وكذلك مناطق داخلية اخرى وذلك بسبب العيوب البلورية أو وجود شوائب غير مرغوبة في منطقة المفرق . فكلا المقاومتين الذاتيتين تقابلان قيمة عامل الملء كما مبين في الشكل 5.8 . وكذلك قيم R_S العالية جداً وقيم R_{sh} الواطئة جداً تقللان تيار الدائرة القصيرة I_{sh} وفولتية الدائرة المفتوحة V_{oc} على التوالي كما مبين في الشكل 5.8 .



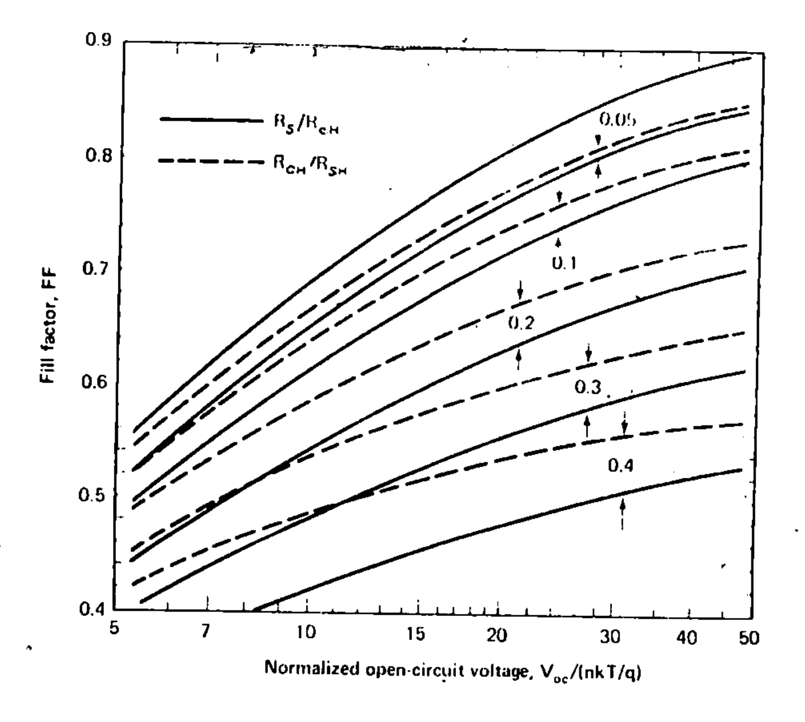
الشكل 5.8 تأثير المقاومات الذاتية على خصائص ما يخرج من الخلايا الشمسية

(a) تأثير المقاومة المتوالية R_S.   (b) تأثير المقاومة المتوازية R_{SH}.

ومن الممكن ايجاد اهمية تأثير كل من R_S و R_{SH} على عامل الملء وذلك بمقارنة قيمتيهما مع المقاومة المميزة (Charactoristic resistance) للخلية الشمسية والتي تعرف بمايأتي (مرجع 5.6).

$$R_{CH} = \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \qquad (5.16)$$

عندما يكون R_S أقل بقليل من هذا المقدار و R_{SH} اكثر بقليل منه فيكون هناك تأثير قليل لكل من R_S و R_{SH} على عامل الملء . وبتعريف المقاومة المعيارية r_s، بـ R_S/R_{CH} يكون التعبير التقريبي لعامل الملء بوجود المقاومة المتوالية (القيمة الدقيقة مذكورة في الشكل 5.9)



الشكل 5.9 المنحنيات العامة لعوامل الملء في الخلايا الشمسية كدالة لفولتية الدائرة المفتوحة المعيارية والمنحنيات الخطية تبين تغير عامل الملء كدالة للمقاومة المتوازية المعيارية R_S/R_{CH} حيث $R_{CH} = V_{oc}/I_{sc}$ والمنحنيات المتقطعة تبين تأثير المقاومة المتوازية . والعنصر المعياري في هذه الحالة هو R_{CH}/R_{SH} وهذه المنحنيات تساعد على ايجاد عامل الملء لأي ربط بين فولتية الدائرة المفتوحة ودرجة الحرارة وعامل المثالية معاً مع كل من مقاومة المتوالية والمتوازية .

$$FF = FF_0(1 - r_s) \qquad (5.17)$$

عندما تمثل FF_0 عامل الملء المثالي وعند اهمال المقاومة المتوالية يمكن اعادة قيمته بصورة تقريبية من المعادلة (5.15) . وهذه العلاقة تكون صحيحة لتقرب الى مرتبتين عشريتين عندما يكون $v_{oc} > 10$ و $r_s < 0.4$ وبتعريف المقاومة المتوازية المعيارية التي تساوي R_{SH}/R_{CH} فهناك علاقة مماثلة لتأثير المقاومة المتوازية والتي تتضمن ايضاً الفولتية المعيارية المعرفة بـ $v_{oc} = V_{oc}/(nkT/q)$ وهذه العلاقة (القيم الدقيقة مذكورة ايضاً في الشكل 5.9) .

$$FF = FF_0 \left\{1 - \frac{(v_{oc} + 0.7)}{v_{oc}} \frac{FF_0}{r_{sh}}\right\} \qquad (5.18)$$

وهذه العلاقة تكون صحيحة لتقرب الى ثلاثة مراتب عشرية للحالة $v_{oc} > 10$ و $r_{sh} > 2.59$ عندما تكون المقاومتان المتوالية والمتوازية مهمتين ، فإن العلاقة التقريبيه لمدى معين من القياسات ، هي المعادلة (5.18) مع تعويض FF_0 بـ FF المحسوبة من المعادلة (5.17) .

5.5 قياس الكفاءة EFFICIENCY MEASUREMENT

ربما يبدو اول وهلة ان من السهل قياس كفاءة الخلية الشمسية .وذلك بقياس قدرة ضوء الشمس الساقط بواسطة البايرونومتر (Pyranometer) واعلى قيمة كهربائية متولد من الخلية ، غير ان هذه المحاولة تكون صعبة التحقيق وذلك لان اداء الخلية المقاسة بهذه الطريقة سيتعمد بصورة كبيرة على المحتويات الطيفية الدقيقة لضوء الشمس والذي يتغير باختلاف كتلة الهواء والبخار الموجود فيها والعكرة الجوية ... الخ وربط هذه العوامل مع وجود نسبة الخطأ في ضبط البايرونومتر بـ (∓5%) يجعل من الصعب المقارنة بين اداء الاجهزة المقاسة في اماكن وازمنة مختلفة .

وعليه فإن الحل البديل هو استخدام طريقة مبينة على ضبط الخلايا المرجعية (calibrated refercene cells) تحت الظروف الضوئية القياسية . ويقاس اداء الخلية التي تحت الاختبار نسبة الى الخلية المرجعية . ولكي تبقى هذه التقنية صحيحة يجب ان يتحقق الشرطان الآتيان :

١ ـ ان الاستجابة الطيفية للخلية المرجعية والخلايا المختبرة يجب ان تكون متشابهة ضمن حدود معينة .

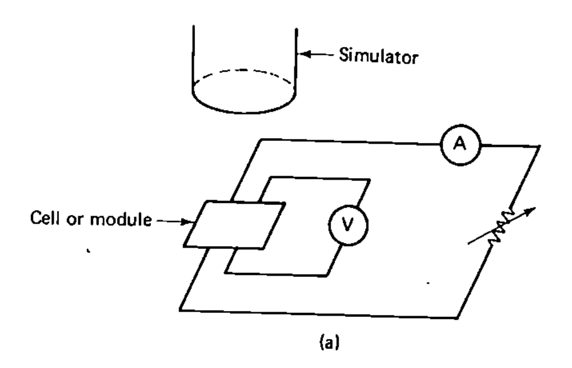
٢ ـ ان الطيف الموجود في الضوء المستخدم للاختبار المقارن يجب ان يقارب ذلك الموجود في الاشعاع القياسي . وضمن حدود معينة

فالشرط الاول يعني ان الخلية المرجعية والخلايا المختبرة تصنع من مادة شبه الموصلة نفسها وبتقنية مشابهة وعندما يتحقق كلا الشرطين فإن جميع القياسات ترجع الى ظروف الاضاءة القياسية في مركز الضبط (calibration center). وتستخدم تقنية مشابهة للتقنية التي اوجزت اعلاه في برامج الطاقة الامريكية / شعبة الفوتوفولطائية . وفي هذه الحالة فإن التوزيع الطيفي القياسي لضوء الشمس المستخدم كمرجع للقياسات هو توزيع AM1.5 الموضح في الشكل 1.3 وان المصادر الضوئية المفضلة للاختبار هي ضو الشمس الطبيعي (مع اخذ الغيوم وكتلة الهواء ومعدل تغير الشدة بعين الاعتبار) وضوء مصباح الزينون المرشح أو مصباح ELH . الاخير هو الضوء الناتج من توهج التنكستن يكون رخيص التكاليف كما يحوي عاكساً جيداً للاطوال الموجبة المرئية . أو يسمح للاطوال تحت الحمراء بالخروج من خلف المصباح . وهذا يساعد على زيادة الطيف المرئي للضوء الخارج ويجعله قريباً بدرجة مقبولة الى طيف ضوء الشمس . وان يعطي مصدر الضوء حزمة مسددة منتظمة الشدة لمنطقة الاختبار وتبقى ثابتة خلال فترة القياس وضمن حدود معينة .

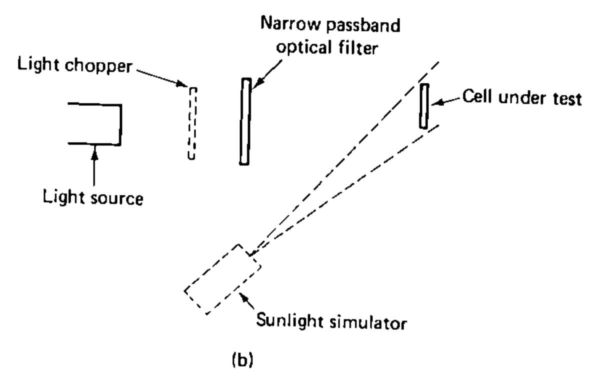
والشكل 5.10a يبين ترتيب تجربة نموذجية لقياس مايخرج من الخلية الشمسية . ان عملية التوصيل باربع نقاط والتي تكون فيها تيار وفولتية الخلية المختبرة منفصلة عن بعضها مرغوبة . هذا الترتيب يقلل من تأثير مقاومة الاسلاك المستعملة ومقاومات التماس (contact resistance). وتثبت الخلايا المختبرة على جسم يمكن السيطرة على درجة حرارته . وتكون الدرجتان 25°C و 28°C الدرجتين الحراريتين القياسيتين لقياسات الخلية الشمسية . ويمكن تنظيم كثافة ضوء المصباح للحصول على الشدة المطلوبة والمقاسة بواسطة الخلية المرجعية . بتغيير المقاومة المتغيرة يمكن الحصول على خصائص الخلية المراد اختبارها ويمكن قياس الاستجابة الطيفية للخلية المختبرة مباشرة بمقارنة مايخرج من الخلية مع خلية ذات استجابة طيفية قياسية .

وان ابسط طريقة هي استخدام مصدر احادي اللون المستقر في جهاز موحد اللون (monochromator) أو امرار الضوء الابيض خلال مرشح ذو حزمة ضيقة (narrow band) كما في الشكل 5.10(b) . بما ان استجابة الخلايا تتزايد مع شدة

الضوء ولاتكون دائماً خطية فالطريقة المفضلة في هذه الحالة هي استعمال ضوء ابيض مقارب لضوء الشمس لاضاءة الخلية بصورة مستمرة وقياس الاستجابة التدريجية للضوء المتناوب احادي اللون الساقط مع الضوء المستمر .



(a)



(b)

الشكل 5.10(a) ترتيب تجربة لاختبار الخلايا والانواع الشمسية (b) نصب تجربة لقياس الاستجابة الطيفية وهناك حاجة لمصدر ضوئي مستمر وضوء نبضي احادي اللون للخلايا التي لها الاستجابة الطيفية اللاخطية .

5-6 الخلاصة SUMMARY

ان الحد الأعلى لكفاءة الخلايا الشمسية تقع بين 28-29% . ويحدث ذلك عندما تكون الفجوة المحظورة بين 1.4-1.6 الكترون فولت . تتجمع عدة عوامل وتعمل على أن تجعل كفاءة الخلايا الشمسية الحقيقية قليلة الى حد ما من الحالة التالية وبعض هذه العوامل تتعلق بتفاعل الضوء مع مادة الخلية وبعض منها تتعلق بزيادة إعادة إتحاد داخل مادة شبه الموصل وبعضها الآخر بالتأثيرات المقاومة الذاتية للخلية .

تتناقص كفاءة الخلايا الشمسية مع زيادة درجة الحرارة . ويرجع سبب ذلك الى تأثير درجة الحرارة على فولتية الدائرة المفتوحة . ان الطرف التجريبية المفضلة لقياس اداء الخلية الشمسية هي المبنية على اساس استخدام الخلية المرجعية القياسية وذلك للتخلص من المتغيرات الناتجة من الطرف المباشرة .

تمارين

5.1 . (a) خلية شمسية مضاءة بصورة منتظمة وبضوء احادي التردد ذي طول موجي 700 نانومتر وشدة 20 ملي واط / سم٢ ماهو فيض الفوتونات المناظر والحد الاعلى لتيار الدائرة القصيرة I_{sh} للخلية . علمت ان الفجوة المحظورة لها 1.4 الكترون فولت .

(b) وما التيار المماثل عندما تكون الفجوة المحظورة 2.0 الكترون فولت

5.2 . عند الأضاءة بالأشعاع AM1.5 المدون الجدول 1.1 فان أعلى كفاءة للتيار الذي يمكن الحصول عليه في تصميم معين للخلية الشمسية هي 40 ملي أمبير اذا كانت القيمة العظمى لفولتية الدائرة المفتوحة عند درجة 300 كلفن هي 0.5 فولت فما هو اعلى حد الكفاءة في هذه الخلية عند هذه الدرجة .

5.3 . تم إضاءة الخلية الشمسية بضوء احادي التردد شدته 100 ملي واط / سم٢ القيمة الادنى لتيار الاشباع عند درجة الحرارة 300 كلفن هي 10^{-11} أمبير / سم٢ .

5.3 . اضيئت خلية شمسية بضوء احادي التردد شدته 100 ملّي واط /سم٢ فاذا علمت ان القيمة الأدنى لتيار الاشباع عند درجة 300 كلفن 10^{-11} أمبير / سم٢ . أوجد الحدود العليا لكفاءة تحويل الشمس الى طاقة كهربائية . عندما يكون الطول الموجي للضوء الساقط (a) 450 نانومتر (b) 900 نانومتر . افرض في حالة (a) و (b) طاقة الفوتون اكبر من الفجوة المحظورة . (c) فسر الاختلاف في القيم الناتجة .

5.4 . إحسب مع الرسم اعلى حد للاستجابة الطيفية (تيار الدائرة القصيرة/قدرة ضوء احادي التردد الساقط) كدالة للطول الموجي لخلية شمسية سليكونية .

5.5 . فولتية الدائرة المفتوحة النموذجية للخلية السليكونية 0.6 فولت ولخلية GaAs 1.0 فولت ، قارن إعتماد فولتية الدائرة المفتوحة على درجة الحرارة نظرياً عند درجة حرارة 300 على الاساس النسبي والمطلق (الفجوة المحظورة عند درجة الصفر المطلق للسليكون و GaAs 1.2 و 1.57 الكترون فولت على التوالي)

5. من الشكل 5.5 قارن السمك المطلوب لكل من Si و GaAs للحصول على 75% من اقصى تيار عند الاضاءة باشعاع AM0 .

5.7 خلية شمسية لها خصائص مثالية وعامل المثالية 1 والخلية الثانية تسود على خصائصها عملية اعادة الاتحاد في منطقة الاستنزاف ولها عامل المثالية 2 . وتعطى الخليتان ، عند درجة حرارة 300 كلفن فولتية الدائرة المفتوحة نفسها 0.6 فولت . قارن بين عامل الملء المثالي للخليتين .

5.8 خلية شمسية ، عند درجة حرارة 300 كلفن ، لها فولتية الدائرة المفتوحة 550 ملي . فولت وتيار الدائرة القصيرة 2A وعامل المثالية 1.3 . أوجد عامل الملء تحت الظروف التالية

(a) المقاومة المتوالية 0.08 أوم والمقاومة المتوازية عالية

(b) المقاومة المتوالية مهملة والمقاومة المتوازية 1 أوم

(c) المقاومة المتوالية 0.08 أوم والمقاومة المتوازية 2 أوم

(d) المقاومة المتوالية 0.02 أوم والمقاومة المتوازية 1 أوم .

REFERENCES

[5.1] H. J. HOVEL, *Solar Cells*, Vol. 11, Semiconductors and Semimetals Series (New York: Academic Press, 1975).

[5.2] W. SHOCKLEY AND H. J. QUEISSER, "Detailed Balance Limit of Efficiency of *p-n* Junction Solar Cells," *Journal of Applied Physics 32* (1961), 510-519.

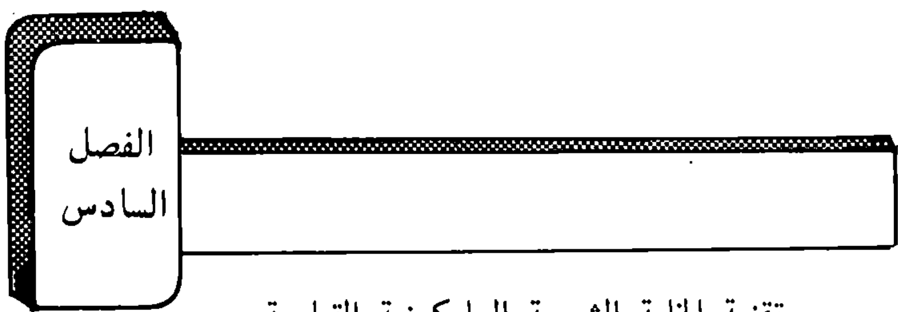
[5.3] R. L. MOON et al., "Multigap Solar Cell Requirements and the Performance of AlGaAs and Si Cells in Concentrated Sunlight," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Washington, D.C. (1978), pp. 859-867.

[5.4] C. T. SAH et al., "Carrier Generation and Recombination in *p-n* Junctions. . . ," *Proceedings of the IRE 45* (1957), 1228-1243.

[5.5] J. G. FOSSUM et al., "Physics Underlying the Performance of Back-Surface-Field Solar Cells," *IEEE Transactions on Electron Devices ED-27* (1980), 785-791.

[5.6] M. A. GREEN, "General Solar Cell Factors. . . ," *Solid-State Electronics 20* (1977), 265-266.

[5.7] *Terrestrial Photovoltaic Measurement Procedures*, Report ERDA/NASA/ 1022-77/16, June 1977.



تقنية الخلية الشمسية السليكونية القياسية

STANDARD SILICON SOLAR CELL TECHNOLOGY

6.1 المقدمة INTRODUCTION

بعد ان ظهرت اول خلية سليكونية بكفاءة مناسبة عام 1953 تم استخدام هذه الخلايا بشكل واسع كمصدر لتوليد القدرة الكهربائية للسفن الفضائية. واستخدمت الخلايا اول مرة في فانكورد 1 (Vanguard 1) في عام 1958. ومنذ ذلك العام اخذت صناعة الخلايا الشمسية تتطور بشكل بطيء لتجهيز الاعداد المتزايدة من شبكات الاقمار الصناعية (communication Satellite) والسفن الفضائية الاخرى. والطلب على هذه الخلايا ـ وان كان قليلاً ـ والاعتماد عليها في الفضاء ادى الى ظهور التقنية القياسية(standand technology) لهذه الخلايا والتي بقيت نوعاً ما بدون اي تغيير يذكر طوال فترة الستينات وبداية السبعينات من هذا القرن.

منذ عام 1973 بدأ الاهتمام يتجه الى ايجاد مصادر الطاقة المتجددة مما دفع عدداً من المصانع الى ان تقدم انتاجها من الخلايا الخاصة للاستعمالات الارضية والجدول 6.1 يقدم قائمة باسماء اشهر مصانع الخلايا الشمسية في العالم. ففي البداية اعتمدت هذه المصانع على التقنية القياسية الخاصة بصناعة الخلايا للاستخدمات الفضائية فقط غير ان المتطلبات المختلفة لاستخدامات الارضية لهذه الخلايا تطلبت بعض التغييرات في التقنية القياسية. وفي هذا الفصل نصف القاعدة الاساسية لمناقشة التغير والتوسعات المحتملة في المستقبل.

جدول 6.1 مصانع الخلايا الشمسية (crica 1980)

United States	
Applied Solar Energy Corporation 15251 East Don Julian Road City of Industry, CA 91746	Solar Power Corporation 20 Cabot Road Woburn, MA 01801
Arco Solar, Inc. 20554 Plummer Street Chatsworth, CA 91311	Solarex Corporation 1335 Piccard Drive Rockville, MD 20850
Motorola, Inc. Solar Energy Department Phoenix, AZ 95008	Solec International, Inc, 12533 Chadron Avenue Hawthorne, CA 90250
Photon Power, Inc. 10767 Gateway West El Paso, TX 79935	Solenergy Corporation 23 North Avenue Wakefield, MA 01880
Photowatt International, Inc. 21012 Lassen Street Chatsworth, CA 91311	Spectrolab, Inc. 12484 Gladstone Avenue Sylmar, CA 91342
SES Incorporated Tralee Industrial Park Newark, DE 19711	Spire Corporation Patriots Park Bedford, MA 01730
Europe	
AEG Telefunken Discrete Component Dept. P.O. Box 1109 7100 Helibronn, W. Germany	RTC (Philips Group) Route de la Delivrande 14000 Caen-Cedex, France
Japan	
Japan Solar Energy Co. 11-17 Kogahonmachi Fushimiku, Kyoto	Sharp Corp. Engineering Division 2613.1 Ichinomoto Tenri-Shi, Nara
Matsushita Electric Kadoma, Osaka	
Australia	*India*
Tideland Energy Pty. Ltd. P.O. Box 519 Brookvale, N.S.W. 2100	Central Electronics Ltd. Site 4, Industrial Area Sahibabad, U.P. 201005

يمكن تخليص مراحل التقنية القياسية لصناعة الخلايا الشمسية في النقاط الاتية :

١ـ اختزال الرمل للحصول على خام السليكون المعدني (Mtallurgical-grade Silicon) .
٢ ـ تنقية خام السليكون المعدني وتحويله الى شبه موصل سليكوني .
٣ ـ تحويل شبه الموصل السليكوني الى رقائق احادية البلورة .
٤ ـ اجراء معالجات متتالية بالرقائق السليكون احادية البلورة لعمل الخلايا الشمسية .
٥ ـ تغليف الخلية السليكونية وترتيبها بحيث تقاوم الظروف الجوية .

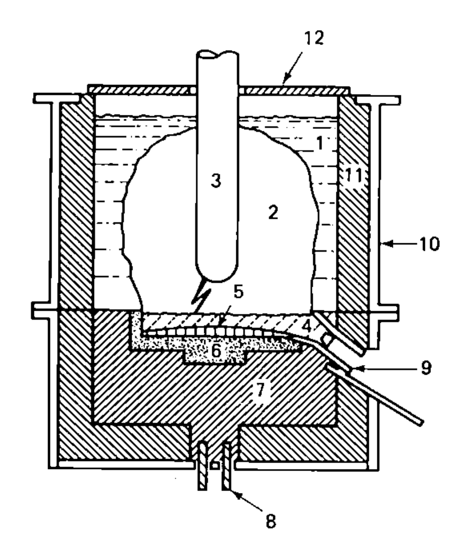
6.2 تحويل الرمل الي خام السليكون المعدني
SAND TO METALLURGICAL-GRADE SILICON

يأتي السليكون في المرتبة الثانية من حيث الوفرة من القشرة الارضية حيث يوجد على شكل مركبات السليكون (SiO_2) التي تشكل الجزء الاعظم من الرمل . ويستخدم في الوقت الحاضر الشكل البلوري لثاني اوكسيد السليكون لاستخلاص السليكون تجارياً ، حيث تختزل هذه المادة بواسطة افران قوسية كما في الشكل 6.1 ويتم تسخينها بالكاربون (مزيج من نشارة الخشب وفحم الكوك والفحم الحجري) للحصول على السليكون حسب التفاعل التالي (مرجع 6.1) :

$$SiO_2 + 2C \longrightarrow Si + 2CO \qquad (6.1)$$

يصب سائل السليكون بشكل دوري ويمرر غاز الاوكسجين او مزيج الاوكسجين ـ كلور فوق سائل السليكون ليصير اكثر نقاوة ثم يصب في قوالب غير عميقة وبعد تبريدها تقطع الى قطع صغيرة .

يستخلص سنوياً حوالي مليون طن متري من خام السليكون المعدني (MG.Si) في العالم بصورة رئيسية للاستعمال في صناعة الالمنيوم والفولاذ (Steel) وبدرجة نقاء 98–99% مع نسبة قليلة من الشوائب اكثرها من الحديد والالمنيوم كما مبين في جدول 6.2 . وان كلفة الطاقة اللازمة لعملية استخلاص خام (MG–Si) تكون مقبولة ومقاربة لكلفة الطاقة اللازمة لعملية استخلاص الالمنيوم او التيتانيوم . ويكون خام السليكون هذا رخيص الثمن . وتتم تنقية جزء قليل من هذا الخام



الشكل **6.1** مقطع عرضي يبين المعالم النموذجية للفرن القوسي الذي يستخدم لانتاج خام السليكون المعدني
1- الكاربون والكوارتز **2**- حجرة **3**- القطب **4**- السليكون **5**- سليكون كاربايد **6**- موقد
7- عجينة القطب **8**- اقطاب نحاسية **9**- صنبور التفريغ **10**- قالب حديدي واق **11**- الخزف
12- الغطاء الكاربوني (من مرجع **6.1**) .

لتحويله الى شبه الموصل (SeG) واستخدامه في صناعة الالكترونيات اذ تستعمل الاف الاطنان المترية من مادة SeG النقية في هذه الصناعة سنوياً .

جدول **6.2** تركيز الشوائب النموذجية في خام السليكون المعدني

Impurity	*Concentration range* (parts per million, atomic)
Al	1500–4000
B	40–80
Cr	50–200
Fe	2000–3000
Mn	70–100
Ni	30–90
P	20–50
Ti	160–250
V	80–200

6.3- تحويل خام السليكون المعدني الى خام سليكون شبه موصل

METALLURGICAL-GRADE SILICON TO SEMICONDUCTOR-GRADE SILICON

ان السليكون المستعمل في الخلايا الشمسية والنبائط شبه الموصلة الاخرى يجب ان يكون انقى بكثير من خام السليكون المعدني والطريقة النموذجية للحصول على مادة نقية تعرف بعملية سيمنس (Siemnes process) (مرجع6.2) . ففي هذه العملية يحول خام السليكون (MG–Si) الى مركب كيمياوي متطاير ثم يكثف ويكرر (refind) بواسطة التقطير الجزئي (fractional distillation) وبعد هذه المعالجات يصبح السليكون نقياً جداً . وتجري بعد ذلك معالجات متتالية اخرى ، فيذوب قليلاً من بلورات MG–Si في حامض Hcl وبوجد النحاس كعامل مساعد للحصول على التفاعل الاتي :

$$Si + 3HCl \longrightarrow SiHCl_3 + H_2 \qquad (6.2)$$

وتمرر الغازات الناتجة من التفاعل خلال مكثف لتحول الى سائل يخضع لعملية التقطير الجزئي المضاعف للحصول على SeG-SiHCl (ثالث بيكلوريد السليكون) هو المصدر الاساس لصناعة السايكون ولاستخلاص SeG–Si يختزل المركب $SeG\text{-}SiHCl_3$ بواسطة الهيدروجين وذلك بتسخين المزيج حيث يترسب السليكون على شكل حبيبات بلورية على قضيب سليكوني مسخن كهربائي حسب التفاعل الاتي :

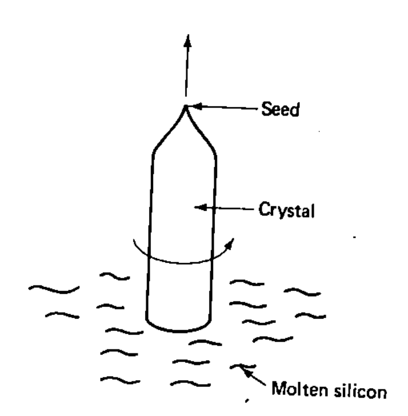
$$SiHCl_3 + H_2 \longrightarrow Si + 3HCl \qquad (6.3)$$

والخطوة الاخيرة اضافة الى حاجتها الكبيرة الى الطاقة فان انتاجيتها قليلة اي بحدود (37%) . وهذا السبب الرئيس لاستهلاك الطاقة بكميات كبيرة جداً في مرحلة استخلاص (SeG–Si) مقارنة باستخلاص (MG–Si) والذي يناقش في الفقرة 6.7 ان استهلاك الطاقة في المرحلة الاخيرة يزيد من الكلفة بشكل كبير ولهذا السبب يعتبر تحسين هذه المرحلة الهدف الرئيس لتقنية استخلاص السليكون .

6.4 تحويل خام سليكون شبه موصل متعدد البلورات الى رقائق احادية البلورة

SEMICONDUCTOR-GRADE POLYSILICON TO SINGLE-CRYSTAL WAFERS

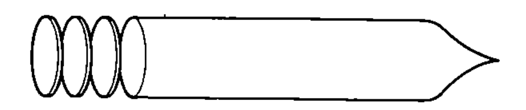
ان السليكون المستعمل في صناعة الالكترونيات لايكفي ان يكون نقيا جداً فحسب بل يجب ان يكون على شكل تركيب احادي البلورة خال من العيوب تماماً . وان الطريقة الرئيسة المستخدمة لانتاج مثل هذه المواد هي عملية جوكر السكي (Czochralski process) المبينة في الشكل 6.2 ففي هذه العملية يصهر سليكون متعدد البلورات (SeG-Si) في بودقة صلبة مع كميات ضئيلة من الشوائب اللازم ادخالها في التركيب ويستخدم البورون (Boron) عادة لعمل طبقة P- . باستخدام بلورة النواة (seed crystal) وبالسيطرة الدقيقة على درجة الحرارة يمكن سحب اسطوانة احادية البلورة من السليكون حيث يمكن بهذه الطريقة تنمية بلورات كبيرة اسطوانية الشكل بقطر 12.5 سم وبطول 1-2 متر وبصورة مستمرة .



الشكل 6.2 المعالم الاساسية في عملية جوكرالسكي لانماء قالب اسطواني كبير من السليكون احادي البلورة .

كما لوحظ في الفقرة 5.4.2 ان الخلايا الشمسية تحتاج الى سمك 100 مايكرون او اقل لتستطيع امتصاص غالبية الاطوال الموجية في الطيف الشمسي . لذا تقطع البلورة الكبيرة الى شرائح رقيقة ومنتظمة كما في الشكل 6.3 غير ان التقنية الحالية للتقطيع (مرجع 6.3) في الوقت الحاضر تلاقي صعوبة في تقطيع البلورة

الاسطوانية الى رقائق بسمك اقل من 300 مايكرون مع المحافظة على انتاجية مقبولة؛ حيث ان اكثر من نصف السليكون المنتج يهدر ويضيع عند القطع على شكل نشارة القطع او قطع غير ملائمة . وهذا الانتاج القليل لهذه المرحلة اي تحويل SeG الى شرائح احادية البلورة عامل سلبي اخر يضاف الى سلبيات التقنية القياسية للسليكون .



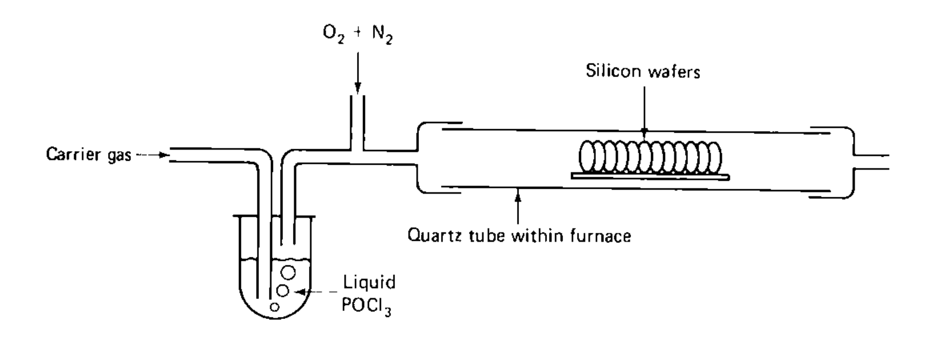
الشكل 6.3 قطع الشرائح الرقيقة من القالب الاسطواني . وتم وصف ومقارنة عمليات القطع المختلفة في (مرجع 6.3) حيث يضيع نصف القالب تقريباً كنشارة أو الكسر عند القطع في هذه العملية

6-5 تحويل السليكون احادي البلورة الى الخلايا الشمسية :

SINGLE-CRYSTAL WAFERS TO SOLAR CELLS

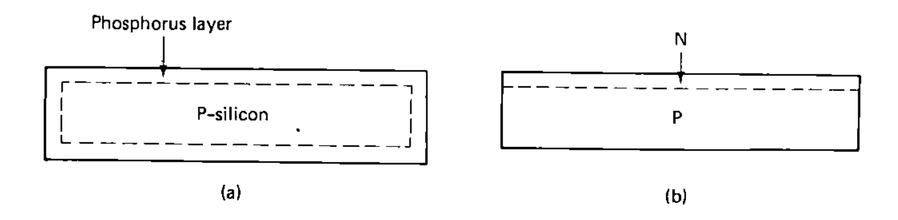
بعد التنظيف الكيمياوي للرقائق السليكونية (لإزالة ما علق اثناء عملية القطع) تضاف كميات اخرى من الشوائب الى هذه الرقائق بواسطة عملية الانتشار عند الدرجات الحرارية العالية .

لقد ذكرنا في الفقرة السابقة انه في عملية جوكرالسكي تضاف كميات قليلة من البورون الى السليكون المنصهر وعليه فان الرقائق الناتجه تكون من نوع p– ويتطلب عمل الخلية الشمسية عمل طبقة سطحية من نوع n– وذلك لعمل مفرق p–n وبصورة عامة يستخدم الفسفور كشوائب لعمل نوع n– . وفي اكثر عمليات الانتشار شيوعاً يمرر تيار من غاز خامل في محلول ثالث كلورو اوكسيد الفسفور ($POCl_3$) ليخرج الغاز محملاً بالفسفور ويمرر الغاز المحمل مع جزء قليل من الاوكسجين الى فرن اسطواني ساخن يحتوي على صف متراص من الرقائق السليكونية كما مبين في الشكل (6.4) وبذلك تتكون طبقة من الاوكسيد على سطح الرقيقة تحتوي في تركيبها الفسفور . وعند حرارة 800 الى 900 درجة مئوية ينتشر الفوسفور من الاوكسيد الى داخل السليكون تاركاً طبقة الاوكسيد وبعد 20 دقيقة يطغى الفسفور على البورون في المناطق السطحية للرقيقة المطعمة بالبورون مكوناً بذلك طبقة مركز من نوع n– كما في الشكل 6.5.(a) وبعد ذلك تزال طبقة الاوكسيد وكذلك المفرق في الجوانب والسطح الخلفي ليتكون تركيب بشكل 6.5 (b)



الشكل 6.4 يبين عملية انتشار الفسفور في رقائق السليكون

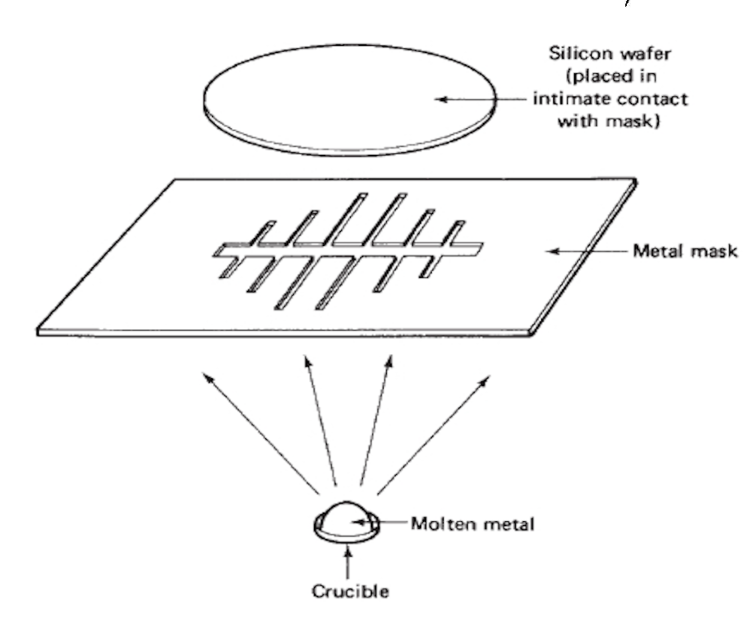
ويتم ربط التوصيلات المعدنية بطبقة النوع -n وطبقة النوع -p ذلك في التقنية القياسية بالتبخير الفراغي (Vaccuum evapuration) . ففي هذه العملية يسخن المعدن في حجرة مفرغة الى ان يتبخر ويترسب على الاجزاء الباردة الواقعة في طريقها ومن بينها الخلايا الشمسية ويتم عمل القطب الخلفي بترسيب المعدن على السطح الخلفي للخلية ليغطي هذا السطح كلياً بينما التوصيل المعدني الامامي يكون على شكل شبكة . وهناك طريقتان مختلفتان لتحديد شكل القطب الامامي احداهما استعمال قناع معدني مشبك حسب المطلوب (شكل 6.6) ، اما في الثانية فان المعدن يرسب على السطح الامامي الكلي للخلية ومن ثم تزال المناطق التي لاتحتاج الى ترسيب المعدن باستعمال تقنية ضوئية تعرف بالنحت الضوئي (Photolithography) يتكون التوصيل المعدني عادة من ثلاث طبقات معدنية ، طبقة معدنية خفيفة من التيتانيوم (Ti) تستخدم كأساس لغرض الالتصاق الجيد بالسليكون وطبقة فضية (Ag) ذات قابلية توصيلية عالية وقابلية جيدة للالتحام كطبقة علوية وترسب سبيكة البالاديوم (Palladium) جيدة الالتحام بين هاتين



الشكل 6.5 توزيع شوائب الفسفور
a — بعد عملية الانتشار مباشرة
b — بعد إزالة الطبقة الخلفية والجانبية للرقيقة

الطبقتين لتمنع حدوث اي تفاعل غير مرغوب فيه بين Ti و Ag عند وجود الرطوبة . وبعد اكمال عملية الترسيب تتلبد (sintered) التوصيلات المعدنية عند درجة حرارة بين 500 الى 600 درجة مئوية لتتكون طبقة جيدة الالتحام وذات قابلية توصيلية جيدة واخيراً ترسب طبقة خفيفة مانعة للانعكاس على الخلية بجهاز الترسيب نفسه .

ان انتاجية خطوات التصنيع هذه حوالي 90% من الرقائق الداخلة وتبخر المراحل العملية المار ذكرها على شكل دفعات ففي كل دفعة تنقل 40 الى 100 شريحة في نفس الوقت وبالتعاقب مما يجعل العملية تعتمد على الجهد البشري . اضافة الى ذلك فان جهاز التبخير غالي الثمن مقارنة بانتاجيته والاكثر من ذلك عند عمل الاقطاب المعدنية ، فان طبيعة عملية التبخير تجعل الا يستفاد من جزء من المعدن المتبخر ولذلك تكون هذه المرحلة عالية التكاليف وخاصة عندما يكون التعامل مع معدن ثمين مثل معدن الفضة .



الشكل 6-6 المتغيرات الاساسية لتبخر الطبقات المعدنية في الفراغ واستخدام القناع المعدني لتحديد نمط القطب المعدني العلوي .

6.6 تحويل الخلايا الشمسية الى الواح شمسية : SOLAR CELLS TO SOLAR CELL MODULES

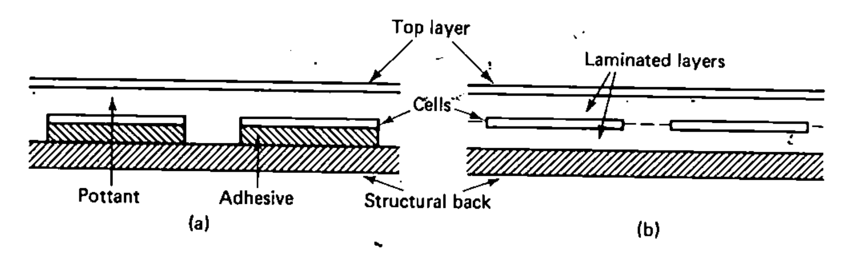
6.6.1 بناء الالواح الشمسية Module Construction

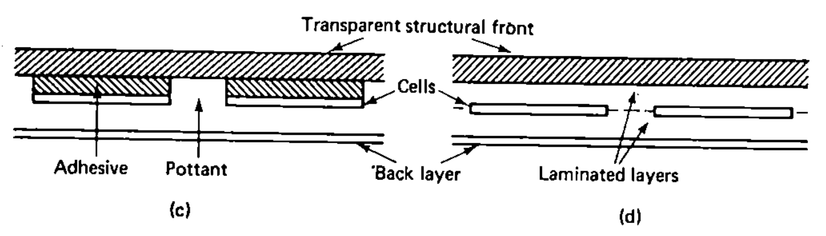
ان فائدة تغليف (encapsulation) الخلايا لاتقتصر على توفير الحماية الميكانيكية فحسب بعمل أيضاً كعازل كهربائي ويوفر نسبة من الحماية الكيميائية كما يزيد التغليف من متانة وصلابة الخلايا الهشة ويحمي الخلايا من الاضرار التي قد تحدث بسبب البرد الشديد ومن الطيور والاجسام الساقطة عليها . ويحفظ التوصيلات المعدنية من التآكل الذي تسببه العناصر المؤكسدة الموجودة في الجو . واخيراً ان عملية التغليف توفر عزلاً كهربائياً للفولتية المتولدة وتصل هذه الفولتية في بعض المنظومات الى 1500 فولت . ان متانة مادة التغليف تزيد من العمر العملي للوح الشمسي فقد يزيد عمر اللوح على 20 سنة .

ومن المميزات الاخرى التي يجب ان تكون في مادة التغليف هي مقاومة الاشعة فوق البنفسجية وقابلية التحمل لتغير درجات الحرارة والصدمات الحرارية التي يمكن ان تسبب الاجهاد أو الكسر . ومقاومة التآكل الذي تسببه العواصف الرملية وكذلك زيادة القابلية على التنظيف الذاتي وقابلية حفظ حرارة الخلية منخفضة لتقلل القدرة المفقودة وان تكون رخيصة الثمن .

وهناك عدة طرق ممكنة لتصميم اللوح فمن العناصر الاساسية لتصميم اللوح هي الطبقة الهيكلية والتي تعطى اللوح قواماً صلباً ، وتقع هذه الطبقة اما امام اللوح الشمسي او خلفه كما مبين في الشكل (6.7) وتلصق الخلايا اما مباشرة بهذه الطبقة وتغلف بجزف مرن (Flexible pottant) او تحاط بصفائح رقيقة تثبت عليها . وتعمل هذه الطبقة كمانع للرطوبة عندما تكون بالخلف وعندما تكون في الواجهة الامامية فتقوم بالتنظيف الذاتي وزيادة المقاومة للصدمات ايضاً . وتوضع بعض انواع موانع تسرب الرطوبة عند حافات اللوح .

ومن المواد الشائعة الاستخدام كطبقة هيكلية خلفية للشكل 6.7(a) و 6.7(b) هي الالمنيوم المؤكسد (anodized aluminum) والفولاذ المخزف (Procelainized steel) والواح ايبوكسي epoxy او زجاج الشبابيك العادي . ولعل الالواح الخشبية الخفيفة تكون ارخص مادة لعمل هذه الطبقة . اما المادة المفضلة لعمل التراكيب الامامية في الشكل 6.7(c) و 6.7(d) هي مادة الزجاج اذ تجمع بين القابلية الممتازة على تحمل العوامل الجوية والكلفة المناسبة وقابلية





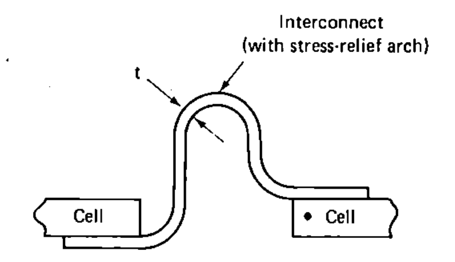
الشكل 6.7 الرسوم التوضيحية تبين الطرق الممكنة لتغليف الخلايا الشمسية
(a) تركيب الهيئة الخلفية
(b) تركيب الهيئة الخلفية مع طبقة الصفائح
(c) تركيب الهيئة الامامية
(d) تركيب الهيئة الامامية مع طبقة الصفائح

التنظيف الذاتي الجيد ويستخدم في اغلب التصاميم اما زجاج معالج (tcmpered glass) أو زجاج مقوى toughned يحتوي على كمية قليلة من الحديد لتحسين النفاذية . اما المواد اللاصقة والعجينة المستخدمة بكثرة هي السليكونات حيث تملك السليكونات مقاومة جيدة للاشعة فوق البنفسجية وقابلية قليلة لامتصاص الضوء ولها مرونة مناسبة وبذلك يخفف الاجهاد الحراري على اللوح ولكنها غالية الثمن . وكذلك المركبات بوليفنل بوتيرل (PVB و butyral (Polyvinyl واثيلين / فينل استيتت (EVA و vinyl acetate / ethylene) يستخدمان في عدة مصانع لنفس الغرض .

اما المواد المناسبة للطبقة العليا في التركيب الخلفي فهي الزجاج المعالج بكمية قليلة من الحديد والبوليمرات (Polymers) مثل اكريلكس (acrylics) حيث تعمل هذه المواد كموانع للرطوبة وتساعد على التنظيف الذاتي . وقد بدأت بعض المصانع انتاج خلايا مقاومة للرطوبة مستخدمة مادة سليكونات لينة تعلوها طبقة خفيفة من السليكونات العضوية الصلبة لتساعد على التنظف الذاتي . ومن المواد الشائعة الاستخدام كطبقة خلفية من التركيب الامامي هي بوليمرات مايلر (Mayler) او تيدلر لتعمل كمانع للرطوبة . وبما ان جميع انواع البوليمرات تتخللها

الرطوبة الى حدما . فان الحل لهذه المشكلة هو ادخال صفيحة رقيقة من الالمنيوم او الاستيل بين طبقات البوليمر المناسب .

وعندما يكون لون الطبقة الخلفية ابيض فقد يزيد هذا مما يخرج من الخلية بصورة ملوحظة وذلك بسبب تأثير تركيز العمق الصفري (zero-depth concentration effect) (مرجع 6.4) ولان قسما من الضوء الذي يصل الى هذه الطبقة العاكسة يتشتت بين الخلايا ثم ينحصر وينعكس بواسطة الطبقة الزجاجية الفوقية الى المناطق الفعالة في اللوح مما يسبب في زيادة ما يخرج من الخلية وبصورة خاصة عندما تكون كثافة رص الخلايا في اللوح قليلة .



الشكل 6.8 عروة ازالة الجهد التي تستخدم عادة في الاتصالات الداخلية بين الخلايا لمنع العطب بسبب الدورة الحرارية والاجهاد الناتج من الريح . ولتبقى العروة فعالة ينبغي ان يكون سمك التوصيلات الداخلية (t) وارتفاع القوس في العروة عالياً . لاحظ مناقشة هذا الموضوع في (مرجع 6.5) .

وهناك جانب اخر مهم في صناعة اللوح هو التوصيلات المعدنية بين الخلايا فمن الشائع عملياً استخدام عدة توصيلات لزيادة الامان من القطع . وهذه الطريقة تزيد من احتمالية استمرار اللوح في العمل في حالة اخفاق (بواسطة تآكل الموصلات او طلاء المعدن) (corrosion or atigue) الموصلات وكذلك عند عطب احدى الخلايا في اللوح . وعند عمل التوصيلات الداخلية للخلايا يجب ان تاخذ مجموعة من التأثيرات مثل معاملات التمدد الحراري وقوة الرياح بعين الاعتبار وغالباً ما يكون التوصيل على شكل مقاومة كما موضح في الشكل 6.8 (مرجع 6.5) .

6.6.2 درجة حرارة تشغيل الخلية Cell Operating Temperature

هناك طرق مختلفة لتغليف اللوح الشمسي وكل طريقة تسبب اختلافاً في درجة حرارة الخلايا المغلفة عند العمل وتحت ظروف مماثلة . وبما ان اداء الخلية يتناسب عكسياً مع زيادة درجة الحرارة ، اي ان اللوح الذي يعمل عند درجة حرارة منخفضة يمتلك نسبة اضافية من الاداء (فقرة 5.3)

ويكون من الافضل مقارنة اداء الواح شمسية مختلفة عند درجات حرارية مختلفة بدلا من مقارنتها عند الدرجة الحرارية نفسها . ففي كل حالة من الحالات تكون هذه الدرجة الحرارية التي تصل اليها الخلايا عند ظروف العمل النموذجي . فاذا عملنا ظروف العمل (مستوى الاشعاع وسرعة واتجاه الريح ودرجة حرارة المحيط والحمل الكهربائي للخلايا) فمن الممكن تحديد درجة حرارة التشغيل القياسي لكل نوع من انواع الالواح . وتدعى هذه الدرجة بدرجة حرارة التشغيل الاعتيادي [nominal operating cell temperature (NOCT)] . ولقد تقدمت التقنيات التجريبية (مرجع 6.6) واصبح من الممكن ايجاد هذه الدرجة من البيانات الحقلية وفي ظروف جوية غير قياسية .

من البيانات الحقلية تبين ان درجة حرارة تشغيل الخلية الشمسية اعلى من درجة حرارة المحيط ولهذا الارتفاع علاقة بشدة ضوء الشمس الساقط عند استقرار سرعة الريح . وكقاعدة عامة في اغلب الاجهزة التجارية ترتفع درجة حرارة الخلية حوالي 30 درجة مئوية فوق درجة حرارة المحيط عند عرضها للاشعاع الشمسي ($100 mW / cm^2$) في مكان منبسط . لذا فان العلاقة التقريبية لدرجة حرارة الخلية هي :

$$T_{cell}(^{\circ}C) = T_{ambient}(^{\circ}C) + 0.3 \times \text{intensity (in mW/cm}^2) \qquad (6.4)$$

وتكون درجة حرارة الخلية المغطاة اعلى من ذلك .

6.6.3 ديمومة اللوح الشمسي Module Durability

بما ان تشغيل الخلايا الشمسية لاتصاحبه حركة ميكانيكية فان ديمومة الخلية يعتمد بالدرجة الاولى على متانة التغليف الا ان اسباب التردي (degradation) عند الاستخدامات الحقلية تعزى الى :

١ ـ كسر الخلايا نتيجة الاجهاد الناتج من التغيرات الحرارية او بسبب التقلصات نتيجة البرد الشديد .
٢ ـ تآكل المعادن
٣ ـ تفكك طبقات التغليف
٤ ـ تغير لون مادة التغليف
٥ ـ تراكم الملوثات على اللوح الشمسي ذي السطوح الناعمة
٦ ـ قطع التوصيلات الداخلية نتيجة عدم تخفيف الاجهاد بشكل مناسب .

ومع زيادة الخبرة العملية في هذا المجال حققت صناعة الالواح الخشبية نجاحاً مهماً في تحسينها وشدة مقاومتها الى المرحلة التي تقاوم فيها لمدة 20 سنة ويتم اختيار متانة الالواح الجديدة بتعريض اللوح للاجهادات الاتية :

1- الدورة الحرارية
2- الرطوبة العالية
3- الاشعاع لفترة طويلة باشعة فوق البنفسجية
4- تسليط ضغط دوري

فان هذه الاجهادات مجتمعة غالباً ما تؤدي الى تردي اللوح الشمسي . ومن الممكن اجراء اختبارات اخرى مثل :

١ ـ اختبار الصدمة
٢ ـ المقاومة للخدش والحك
٣ ـ خصائص التنظيف الذاتي
٤ ـ المرونة (اختبار مدى صلاحية اللوح لوضعه على سطح ملتوي)
٥ ـ العزل الكهربائي (خاصة بعد اختبار العمر

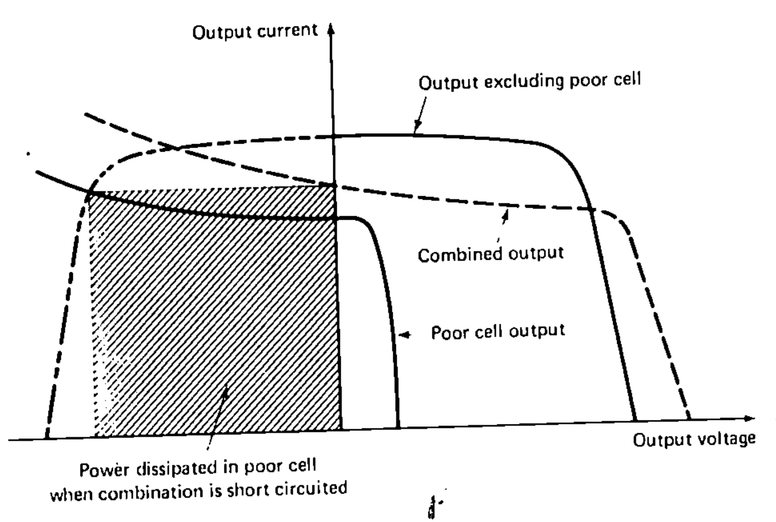
ورغم ان تجمع الملوثات في بعض المناطق يؤدي الى تردي الالواح ذات الاغطية البلاستيكية غير ان ذلك لايكون مشكلة كبيرة بالنسبة للالواح ذات الاغطية الزجاجية . وان التنظيف الذاتي بواسطة الامطار والرياح يجعل القدرة الضائعة نتيجة لهذا التأثير اقل من 10% . وبما ان من الممكن تشغيل الخلية بواسطة الضوء المشتت فقد وجد ان الالواح تعطي نسبة مقبولة من اعلى نتاجها القصوى حتى عندما يغطى بالملوثات الى حد يكون من الصعب تمييز الخلايا المنفردة .

6.6.4 تصميم دائرة اللوح Module Circuit Design

ان اشكال الدائرة الكهربائية التي تربط بها الخلايا داخل اللوح تؤثر بشكل كبير على درجة الاداء وعمر اللوح الشمسي عند ربط الخلايا مع بعضها فان عدم الموائمة في خصائص عملها يجعل القدرة الخارجة للوح اقل من حاصل جمع القدرة القصوى للخلايا المنفردة . والخسارة الناتجة من عدم الموائمة تكون مهمة جداً عندما تربط الخلايا على التوالي .

واهم من ذلك هي القدرة الضائعة نتيجة تسخين الخلية الرديئة الموجودة في السلسلة المتوالية . ويبين الشكل 6.9 خصائص التيار الناتج لاردأ خلية مع خلايا اخرى في السلسلة . وان الفولتية عبر كل من هذا الاجزاء يجب ان تكون متساوية

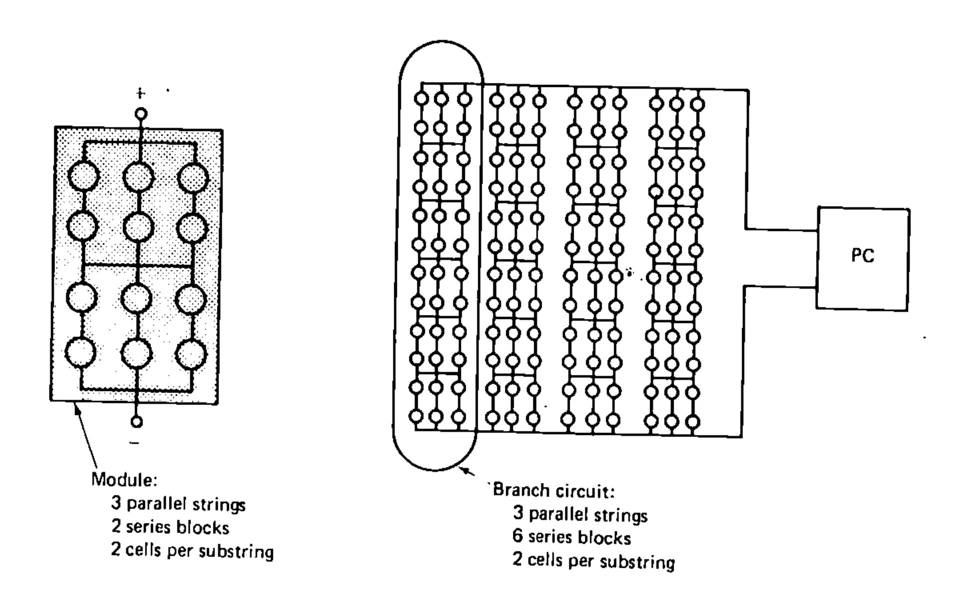
ومتعاكسة في القطبية عند جعل اللوح الشمسي دائرة قصيرة ومن الممكن ايجاد تيار الدائرة القصيرة للوح الشمسي وذلك بعكس احدى المنحنيات المبينة في الشكل 6.9 على محور التيار وتعيين نقطة تقاطعها مع الاخر . فمن الملاحظ تحت هذا الشرط تكون اردأ خلية من السلسلة بالانحياز العكسي ، والمساحة المظللة في الشكل 6.9 تمثل القدرة الخارجة وتظهر فيها القدرة المبددة بسبب اردأ خلية ويبين الشكل (6.9) ان القدرة المبددة تصل الى اعلى قدرة منتجة من باقي السلسلة تحت بعض الظروف . وتسبب هذه التأثيرات ارتفاع في درجة الحرارة عند مناطق الخلية الرديئة مما يضر بغلاف اللوح فيسبب تلف تدريجياً للوح الشمسي . ويحدث تأثيراً مشابها لذلك عند التظليل الجزئي لبعض خلايا اللوح او عند وجود الخلايا المعطوبة .



الشكل 6.9 تأثير خلية ذات ناتج غير موائم مع ناتج سلسلة متتالية من الخلايا . تحت الدائرة القصيرة فان الخلية الرديئة تنحاز عكسياً وتبدد كميات كبيرة من القدرة . والتيار الناتج من السلسلة يحدد بنتاج اردأ خلية من السلسلة .

ليس من الصعب ان نتبين ان فولتية الدائرة المفتوحة لسلسة من الخلايا يساوي مجموع فولتيات الخلايا المكونة لهذه السلسلة . وتظهر بالتيار الناتج من اردأ خلية في السلسلة وهذا يتبعه عدم الموائمة في تيار الدائرة القصيرة للوح يتحدد بالتيار الناتج من اردأ خلية في السلسلة وهذا يتبعه عدم المومئة في تيار الدائرة القصيرة مما يسبب تبديد التيار الناتج من الخلايا الجيدة . وبالرغم من ظهور خسارة مشابهة نتيجة عدم الموائمة في حالة الربط على التوازي لكنها تكون بدرجة اقل .

تستخدم عادة طريقتان للتقليل من شدة هذه الخسارة (مرجع 6.9) احداهما تعرف بالربط المتوازي المتوالي (series parallering) والاخرى باستعمال ثنائيات جانبية تحويلية (bypass diodes) والشكل 6.10 يوضح بعض المصطلحات الفنية المستخدمة في تصميم دائرة اللوح الشمسي من هذا النوع بازدياد عدد القواطع (blocks) المتوالية والسلاسل المتوازية للوح الشمسي او الدائرة الفرعية في تقنية التوازي التوالي يزيد في درجة التسامح لتأثير عدم المواءمة والخلايا المعطوبة والتظليل الجزئي. والمحاولة البديلة لذلك هي استخدام ثنائي جانبي تحويلي بين المقاطع المتوالية في اللوح الشمسي . ان هذا الثنائي الجانب التحويلي ينحاز باتجاه امامي عندما تنحاز المقاطع باتجاه عكسي . وهذا يقلل من القدرة المبددة في المقطع ويوفر مساراً ذا مقاومة واطئة للوح او الدائرة الفرعية .



الشكل (6.10) المصطلحات الفنية المستخدمة في تصميم دائرة اللوح المربع•المؤشر بـ PC هو جهاز تكييف القدرة (مرجع 6.9 1980,IEEE) .

6.7 حسابات الطاقة ENERGY ACCOUNTING

من الطبيعي لاي جهاز مولد للقدرة ان يقوم بتزويد طاقة في عمره العملي اكثر بكثير من الطاقة المصروفة في صناعته وبنائه وصيانته . لنرى على هذا الاساس كيف يكون وضع الخلايا الشمسية السليكونية المصنوعة بواسطة التقنية القياسية التي تم شرحها في هذا الفصل .

ان عملية استخلاص خام السليكون المعدني من الرمل عملية مناسبة من حيث الطاقة . فان الطاقة الكلية اللازمة لاستخراج الخام من المنجم (mine) ونقله وتحضيره لعملية الاستخلاص مع الطاقة اللازمة لاجراء عملية الاستخلاص تساوي 24 كيلو واط ــ ساعة من الطاقة الكهربائية [kwh (e)] لكل كيلو غرام من المادة . ولاتزيد هذه الطاقة عن الطاقة المستخدمة في استخلاص عنصر الالمنيوم [19kwh(e)] او الثيتانيوم [46kwh (e)] .

ان عملية تنقية الخام وتحويله الى شبه موصل بمعالجة سيمنس تكون غالية وغير اقتصادية ، وهذا جعل هذه العملية هدفاً للتبديل في تقنية الخلايا الشمسية في المستقبل ، وعلى القاعدة نفسها المذكورة اعلاه فان الطاقة الكهربائية التي يمكن استخراجها من شبه الموصل هي 621 كيلو واط ــ ساعة من الكهرباء لكل كيلو غرام من المادة (مراجع 6.1)

اما عملية تحويل السليكون النقي الى قوالب اسطوانية من السليكون احادي البلورة بطريقة جوكرالسكي وتقطيعها الى رقائق بلورية عالية التكاليف ، اذ ان معدل الرقائق الناتجة يقدر بـ 0.4 متر مربع لكل كغم من المادة . وسبب كون هذه العملية غير اقتصادية هو ان نصف المادة تهدر كنشارة او قطع غير مفيدة وكذلك قد تنتج رقائق اسمك من المطلوب لانتاج الفوتوفولطائي والطاقة المطلوبة لهذه المرحلة تقدر بـ 1700 كيلو واط ــ ساعة من الكهرباء لكل متر مربع .

اما عملية تصنيع الخلية وتغليفها فتتطلب طاقة تساوي 250 كيلو واط ــ ساعة من الكهرباء . وان الطاقة الكلية اللازمة لانتاج حوالي 90% من الرقائق وتحويلها الى لوح شمسي كامل تساوي 2170 كيلو واط ساعة من الكهرباء لكل م٢ من مساحة اللوح .

ان المدة الزمنية اللازمة لكي نعوض الخلية الطاقة المستهلكة في صناعتها تعتمد على الموقع الذي تستخدم فيه الخلية ، ان الخلية المغلفة التي تعمل بمعدل 5 ساعات في يوم مشمس وصافي بكفاءة 12% وتولد الخلية طاقة سنوية تساوي 219 كيلو واط ــ ساعة للمتر مربع اي ان الزمن اللازم لتعويض الطاقة المستهلكة لايقل عن عشرة سنوات . هذا عدا الطاقة غير المباشرة اللازمة لتصنيع المكائن اللازمة لصنع الخلايا الشمسية والطاقة اللازمة للبيع ونصب الانظمة وخزن الطاقة وتكييف المعدات والتجهيزات والتي ستزيد المدة اكثر من ذلك وان مراحل صناعة الخلايا السليكونية غير الاقتصادية كانت السبب في عدم انتشار استعمال هذه الخلايا بشكل واسع في الماضي الا ان التقنية المحسنة (improved technology) لصناعة الخلايا السليكونية والتي يتم وصفها في الفصل السابع لاتؤدي الى توفر هذه الخلايا

اقتصادياً فحسب بل تقلل من الطاقة اللازمة لصناعة هذه الخلايا بشكل ملحوظ . كما ان هذه التقنية تختصر الفترة الزمنية اللازمة لتعويض الطاقة المستهلكة في صناعتها من عشر سنوات الى جزء من السنة .

6.8 الخلاصة SUMMARY

نشأت التقنية القياسية لصناعة الخلايا الشمسية وتطورت لاستخدامات الفضاء واستمرت في البداية التقنية نفسها لصناعة الخلايا للاستخدامات الارضية ففي هذا الفصل تم وصف هذه التقنية ابتداءاً من مرحلة استخلاص الخام الى مرحلة تغليف الخلية وحفظها في اغطية واقية من الظروف الجوية . وقد وجد ان هذه التقنية في مجالات الاستخدام تحتاج الى تحسينات لانتاج الخلايا للاستخدامات الارضية . وستوضح هذه التقنيات المحسنة في الفصل السابع .

ان الخلايا المنتجة للاستخدامات الفضاء والارض بواسطة التقنية القياسية التي تم شرحها في هذا الفصل تحتاج الى كمية كبيرة من الطاقات قياساً بقابليتها على توليد القدرة . ويمكن التغلب على هذه المشكلة باستخدام التقنيات المحسنة التي نصفها في الفصل القادم .

تمارين

6.1-ارسم مخططاً توضيحياً يبين المراحل الرئيسية لتحويل الرمل (quartzite) الى خلية شمسية سليكونية .

6.2- ضع لوح شمسي من الخلايا الشمسية السليكونية ذات الكفاءة 12% اوجد الفرق في درجة حرارة العمل للخلايا تحت اشعة الشمس الساطعة عندما يكون اللوح دائرة مفتوحة وعندما يولد اقصى قدرة .

6.3- خليتان شمسيتان احداهما لها فولتية الدائرة المفتوحة 0.55 فولت وتيار الدائرة القصيرة 1.3 امبير واخرى لها فولتية الدائرة المفتوحة 0.6 فولت وتيار الدائرة القصيرة 1.0 امبير على فرض ان الخليتين يخضعان لقانون الثنائي المثالي ، احسب فولتية الدائرة المفتوحة وتيار الدائرة القصيرة عند ربطهما (a) على التوالي (b) على التوازي .

6.4- لوح شمسي مثالي يتكون من 40 خلية متماثلة كل واحدة منها لها فولتية الدائرة المفتوحة 0.6 فولت وتيار الدائرة القصيرة 3 امبير. تحت اشعة الشمس الساطعة جُعل اللوح دائرة قصيرة ، تحت اشعة ساطعة وظللت احدى الخلايا جزئياً . على فرض ان الخلايا تخضع لقانون الثنائي المثالي باهمال تأثير درجة الحرارة اوجد القدرة المبددة في الخلية المظللة كدالة للتظليل الجزئي .

REFERENCES

المراجع

[6.1] L. P. Hunt, "Total Energy Use in the Production of Silicon Solar Cells from the Raw Material to Finished Product," *Conference Record, 12th IEEE Photovoltaics Specialists Conference, Baton Rouge*, 1976, pp. 347-352.

[6.2] C. L. Yaws et al., "Polysilicon Production: Cost Analysis of Conventional Process," *Solid-State Technology*, January 1979, pp. 63-67.

[6.3] H. Yoo et al., "Analysis of ID Saw Slicing of Silicon for Low Cost Solar Cells," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaics Specialists Conference, Washington, D.C.*, 1978, pp. 147-151.

[6.4] N. F. Shepard and L. E. Sanchez, "Development of Shingle-Type Solar Cell Module," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D.C.*, 1978, pp. 160-164.

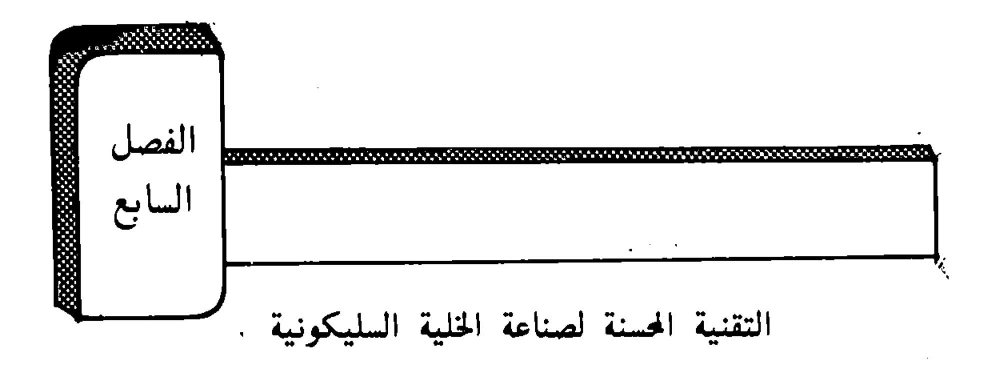
[6.5] W. Carrol, E. Cuddihy, and M. Salama, "Material and Design Consideration of Encapsulants for Photovoltaic Arrays in Terrestrial Applications," *Conference Record, 12th Photovoltaic Specialists Conference, Baton Rouge*, 1976, pp. 332-339.

[6.6] J. W. Stultz and L. C. Wen, *Thermal Performance, Testing and Analysis of Photovoltaic Modules in Natural Sunlight*, JPL Report No. 5101-31, July 1977.

[6.7] E. Anagnostou and A. F. Forestieri, "Endurance Testing of First Generation (Block 1) Commercial Solar Cell Modules," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D.C.*, 1978, pp. 843-846.

[6.8] M. Mack, "Solar Power for Telecommunications," *Telecommunications Journal of Australia 29*, No. 1 (1979), 20-44.

[6.9] C. Gonzalez and R. Weaver, "Circuit Design Considerations for Photovoltaic Modules and Systems," *Conference Record, 14th IEEE Photovoltaics Specialists Conference, San Diego*, 1980, pp. 528-535.



التقنية المحسنة لصناعة الخلية السليكونية .

IMPROVED SILICON CELL TECHNOLOGY

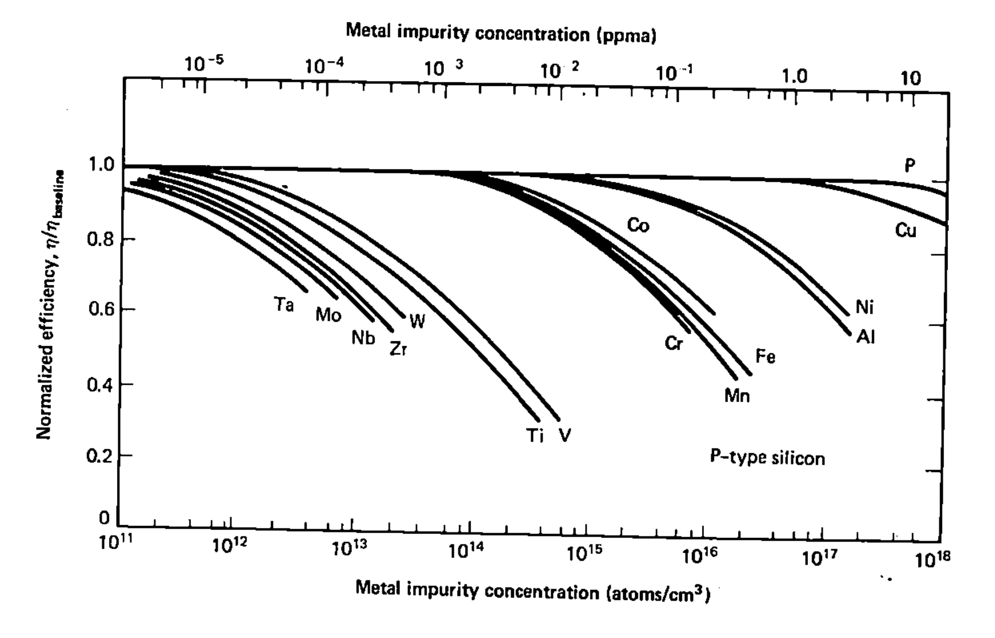
7-1 المقدمة INTRODUCTION

بينا في الفصل السادس التقنية القياسية المستخدمة في صناعة الخلايا الشمسية السليكونية ابتداءً من إستخراج معدن الخام من الرمل الى الخلية الشمسية المغلقة ولاحظنا أن بعض مراحل هذه التقنية مكلّفة إقتصادياً وتحتاج الى طاقة كبيرة وعلى هذا الأساس اتجهت النشاطات على نطاق عالمي الى التقليل من هذه النفقات . وفي هذا الفصل نوضح اهم التقنيات الجديدة لصناعة الخلية السليكونية والتي غيرت ووسعت كثيراً من المراحل العملية التي كانت مرجوة في التقنية القياسية التي تم وصفها في الفصل السادس . إن أغلب هذه التقنيات في مرحلة متقدمة من حيث التطوير وبعضها عند مرحلة الانتاج وضبطها بينما الآخر منها دخل مرحلة الانتاج التجاري .

7.2 سليكون ـ درجة شمسية SOLAR-GRADE SILICON

تبين في الفصل السادس أن السليكون المستخدم في صناعة الخلية الشمسية هو من النوع النقي جداً المنتج لصناعة نبائط أشباه الموصلات . فان التأكيد يكون على نوعية السيلكون عند صناعة الترانسستورات والدوائر المتكاملة ، اما نفقات المادة فلا أهمية لها . أما بالنسبة للخلايا الشمسية ، فإن أداء الخلية وكلفة المادة المصنوعة منها والاساليب الصناعية الخاصة بصناعة الخلية تكون مهمة جداً .

كما ذكرنا في الفقرة 3.4.4 فأن الشوائب في مادة الخلايا الشمسية عموماً تشغل مستويات الطاقة في الفجوة المحظورة وبذلك تعمل كمراكز اعادة الأتحاد . اما في الفقرة 5.4.2 فبينت أن الزيادة في كثافة هذه المراكز تقلل كفاءة الخلية . والشكل 7.1 يوضح نتائج لتجربة من الشوائب المعدنية عندما تكون لوحدها مع الشوائب المطعمة dopant . فان بعض هذه الشوائب المعدنية [Zr, W, Ti,V, Ta, Mo , Nb] يقلل من كفاءة الخلية عندما تكون موجودة بتركيز قليل جداً . اما الشوائب الاخرى الباقية فلاتؤثر على أداء الخلية الشمسية الا عندما تكون اكثر من 10^{15} / سم³ . وهذه تقريباً 100 مرة اعلى من مستوى التطعيم في شبه الموصل الخام السليكوني (SeG-Si) . وهذا يجعلنا نفكر بطريقة بديلة رخيصة للحصول على مادة اقل نقاوة مثل خام السليكون الشمسي (SoG–Si) والتي تعطي كفاءة مناسبة . وهناك عدة عمليات مختلفة تتضح قابليتها في انتاج السليكون بنوعية لا تقل عن خام سليكون شبه الموصل (SeG) وبجزء من الكلفة المقررة للتقنيات التقليدية .



لشكل 7.1 تأثير شوائب مختلفة ثانوية على اداء الخلايا الشمسية (After Ref. 7.1 (c) 1978 IEEE.)

وواحدة من أهم هذه العمليات هي التي اجريت من قبل شركة كاربيد المتحدة (Union Carbide Corporation) والتي تتضمن تحضير غاز السايلين (SiH_4) من خامات السليكون المعدنية وترسيب السليكون من هذا الغاز (المرجع 7.2). وعند تحليل نتائج هذه العملية يتضح أنها قادرة على انتاج السليكون الخمس كلفة العمليات التجارية في الوقت الحاضر وباستخدام سدس الطاقة اللازمة لمثيلاتها. لقد وجد طريقة متطورة أخرى في مختبرات باتل كولمبس (Butelle Columbus Laboratories) والمبنية على أساس اختزال الخارصين (zinc) لرابع كلوريد السليكون (المرجع 7.3) ومن المحتمل أن تحل هذه الطريقة محل عملية سيمنس التقليدية لانتاج السليكون لا في صناعة الخلية الشمسية فحسب بل لصناعة الكترونيات شبه الموصلة بصورة عامة.

7.3 الصفيحة السليكونية — SILICON SHEET

7.3.1 متطلبات الصفيحة — Sheet Requirements

بعد الحصول على السليكون النقي من الضروري تحويله الى صفائح ذات نوعية بلورية جيدة لتستخدم في صناعة الخلايا الشمسية ويكون سمك الرقاقة 100 مايكرون أو اقل للحصول على اقصى نتاج فوتو - فولطائي. وقد سبق وان استخدمت عملية جوكرا لسكي (CZ) لانتاج قوالب من السليكون احادي البلورة اسطوانية الشكل ثم تقطيعه الى صفائح رقيقة. وبما ان طريقة تحويل القالب الى عدد كبير من الخلايا الشمسية بالقطع غير اقتصادية لأنه اضافة الى أن نصف المادة يهدر على شكل نشارة أو قطع غير صالحة وقد تكون الصفائح الناتجة بسمك اكبر مما هو مطلوب وتكون دائرية الشكل مما يسبب عدم تنظيمها بشكل جيد عند رصها وربطها وتغليفها في الالواح الشمسية، ما لم تحول الى اشكال مربعة أو سداسية.

7.3.2 تقنيات القالب السليكوني Ingot Technologies

ان عملية جوكرا لسكي (CZ) هي مثال لتقنية القالب السليكوني غير ان هناك عدة مساوئ وتقيدات في هذه العملية منها تحويل القوالب المنتجة الى صفائح بطريقة القطع. ومن الممكن تحوير عملية جوكرا لسكي النموذجية الى طريقة شبه متواصلة (semicontinous) وتنتج قوالب بنفقات اقتصادية اقل (المرجع 7.4). الا ان القوالب تبقى إسطوانية[1] الشكل والتي لها مساوىء في تطبيقات الخلية الشمسية.

(1) باجراء بعض التحويرات على عملية جوكرا لسكي (مرجع 7.5) يمكن الحصول على قوالب مربعة الشكل تقريباً.

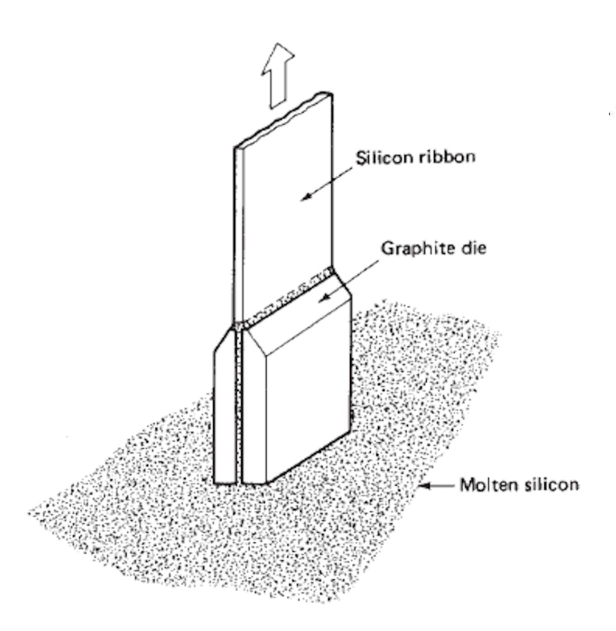
هناك عملية بسيطة اخرى لانتاج القوالب وخاصة بمقاطع عرضية مربعة الشكل وذلك بصب المنصهر في القوالب المربعة . وعموماً يكون القالب المنتج من نوع سليكون متعدد البلورات وهذه لايعد مادة مثالية لعمل الخلايا الشمسية . وفي جميع الاحوال بالسيطرة التامة وضبط جيد للظروف التي يتصلب عندها السليكون المنصهر يمكن الحصول على سليكون متعدد البلورات الحبيبات كبيرة نسبياً . وبأستخدام قوالب من مادة مناسبة يمكن استخدام هذا السليكون لانتاج خلايا ذات اداء جيد مرجع (7.8) .

وباستخدام بلورة النواة المناسبة للتبلور والسيطرة التامة على معدل التصلب كما في طريقة المبادل الحراري (heat exchanger) (مرجع 7.7) يمكن انتاج قوالب أحادي البلورة بنسبة كبيرة بعملية الصب في القوالب . إن أداء الخلايا المصنعة لهذه العملية مقارنة للخلايا المصنعة بعملية جوكرالسكي العالية التكاليف . وقد اثبتت الدراسات ان لهذه العملية فوائد تجارية أهم من تقنيات جوكرالسكي المتطورة (مرجع 7.8) .

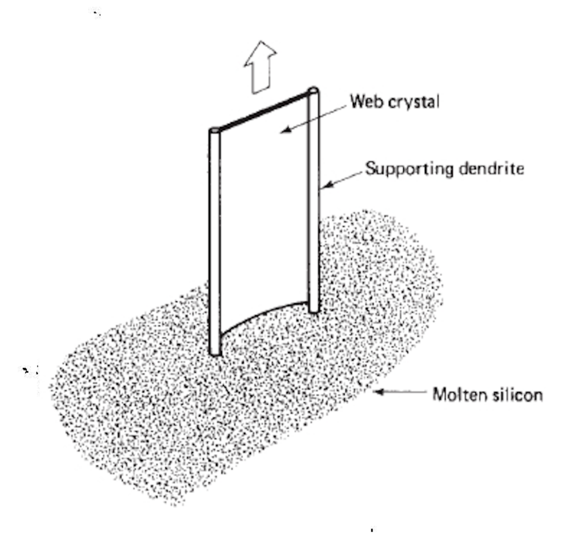
7.3.3 السليكون الشريطي Ribbon Silicon

يمكن التخلص من مساوى عملية القالب ومايصاحبها من تقيدات اذا امكن انتاج اشرطة رقيقة مباشرة من السليكون . فقد ظهرت عدة تقنيات لتحقيق ذلك .

ومن الطرق المتقدمة لانتاج خلايا تجارية هي طريقة انماء شريط محدد الحافة بالتغذية (edge defined film-fed growth) كما مبين في الشكل 2.7 . وهذه التقنية تشبه في بعض الأوجة عملية جوكرالسكي غير ان شكل البلورة المسحوبة تتحد بواسطة شق كرافيتي . حيث يمكن بهذه الطريقة الحصول على أشرطة بلورية رقيقة مباشرة من السليكون المنصهر (المرجع 7.9) والحصول على معدلات عالية من الانتاج وذلك بسحب اشرطة متعددة في الوقت نفسه ومن السليكون المنصهر نفسه (المرجع 710) . والمشكلة الرئيسة لهذه التقنية تتعلق بنوعية المادة المنتجة ، والتي تكون نسبياً رديئة من حيث نوعية بلوراتها عند المقارنة مع عملية جوكرالسكي وسبب ذلك يعود الى عملية النمو حيث تدخل الشوائب الى السليكون المنصهر من القالب الكرافيتى والبودقة والمناطق المحيطة بالفرن المستخدم في عملية نمو الشريط (اما في العمليات الاخرى فان دخول الشوائب مسيطر عليه اثناء عملية النمو) اضافة الى ميل السليكون المنصهر للتفاعل مع كرافيت مما يسبب ترسبات كاربيد السليكون في الشريط و يعيق النمو وترديّ خصائص الخلايا التي تصنع منها .



الشكل 7.2 الخصائص الاساسية لطريقة انماء شريط الحدد الحافة بالتغذية لانتاج الشريط البلوري من السليكون حيث يرتفع السليكون المنصهر في الشق الكرافيتي بفعل الخاصية الشعرية . ويحدد شكل الشريط بشكل الحافة العليا للشق .



الشكل 7.3 طريقة نمو الاغشية السليكونية بالاوتاد ولاتحتاج هذه الطريقة إلى الشق . ويحدد حجم الغشاء بالسيطرة على الانحدار الحراري للسليكون المنصهر حيث تغطس الأوتاد في المنصهر وعند سحبها ينمو غشاء سليكوني بينها .

ان نمو البلورات بطريقة الاوتاد المتفرعة (dentritic web) والمبينة في الشكل 7.3 تتغلب على قسم من هذه المساوىء وذلك عن طريق السيطرة على تدرج درجة الحرارة وتحفيز المادة على النمو على شكل غشاء بين الأوتاد المتوازية المغمور . في منصهر السليكون وعند سحبها خارج المادة المنصهرة يتكون غشاء سليكوني شريطي بين هذه الاوتاد (مرجع 7.11) ثم تتصلب لتعطي غشاء رقيقاً جداً من السليكون محاطاً بحافات سميكة فيمكن إزالة هذه الاشرطة وعمل الخلايا ومن ثم تكرار هذه العملية مرة ثانية ولاتحتاج هذه التقنية الى شق كرافيتي ، ويتمتع السليكون المنتج بهذه الطريقة بخصائص جيدة ويكون مقارب للسليكون المنتج في عملية جوكرا لسكي أهم مشاكل هذه العملية هي الانتاج القليل نسبياً .

والمقارنة بين النماذج الصغيرة نسبياً من الشريط السليكون المنتج بواسطة كلا العمليتين EFG والنمو بين الاوتاد المتوازية مبينة في الشكل 7.4 ويمكن أن نلاحظ في الشكل أن النموذج المنتج بعملية EFD له سطح خشن ومتموج بينما النموجذ المنتج بعملية النمو بين الأوتاد له سطح صقيل .

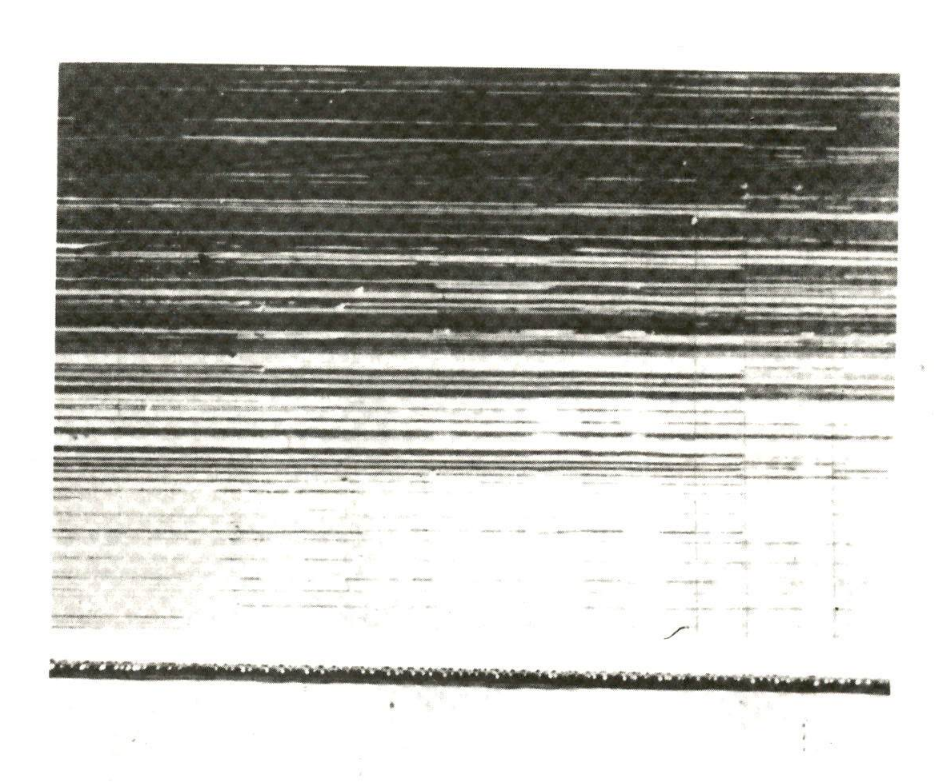
وهناك عدة عمليات أخرى لأنماء الغشاء السليكوني ولكن بدرجات اقل تطوراً . والعملية ذات الانتاجية العالية هي عملية الأنماء الموازي للأفق أو بزاوية صغيرة قريبة من الافق كما مبين . في الشكل 7.5 . ومن أهم مشاكل هذه التقنية هي السيطرة على أبعاد الشريط (مرجع 7.12) . وقد تم ايضاً اكتشاف طريقة أخرى لتحويل قالب السليكون الى شرائح وأغشية رقيقة (مراجع 7.6 و 7.13) .

7.4 صناعة الخلية والتوصيلات البينية

CELL FABRICATION AND INTERCONNECTION

من مساوىء التقنية القياسية المستخدمة في صناعة الخلايا التي تم وصفها في الفصل السادس أنها تعتمد على الإنتاج بدفعات ، وبذلك تكون قابليتها على الانتاجية واطئة وتكون مبددة للمواد خاصة المواد المستخدمة في عمل التوصيلات البينية للخلايا . ولقد أجريت بعض التحسينات للتغلب على هذه المشاكل حيث تم انتاج خلايا تجارية بأداء عالي نسبياً .

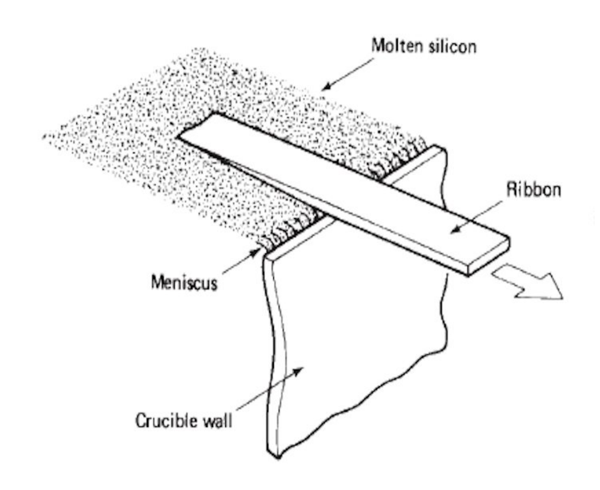
أن أهم التحسينات التي أدخلت هي إستخدام سليكون ذي السطح الخشن ، حيث يستخدم مواد خاصة لعمل مواشير على سطح الدقائق السليكونية كما مبين في الشكل 7.6 . تم تكبير الشكل بواسطة المجهر الألكتروني الماسح (scanning electron microscope) (مرجع 7.14) . ان الضوء المنعكس



الشكل 7.4 المقارنة بين المظهر الخارجي للأغشية السليكونية المصنوعة بطريقة EFG وطريقة نمو الغشاء بين الأوتاد . تم إزالة الاوتاد من الأغشية بعد عمل الخلية (شريط سليكوني من شركة (.laboratories Japan Solar Energy Corporation and Westinghouse Research .

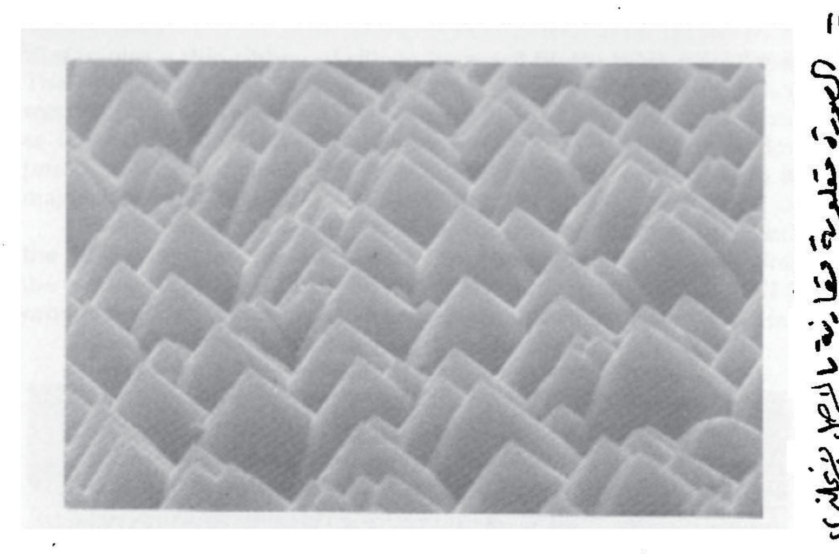
من أوجه هذه المواشير يتجه نحو الأسفل ليسقط ثانية على الخلية . ومع استخدام الطلاء غير العاكس ، فإن نسبة الضوء المفقود بسبب الأنعكاس تتناقص الى أقل من جزء بالمائة . ويتبين في الفصل الثامن أن هذه التقنية تعمل باداء مقبول حتى بدون طلاء غير عاكس .

وفي التقنية القياسية يتم عمل مفرق p-n بانتشار الشوائب الثلاثية والخماسية التكافؤ في رقائق السليكون . وهناك تقنيات أخرى اقل كلفة من طريقة الانتشار وذلك برش طبقات محتوية على الشوائب المطلوبة على سطح الرقيقة ويتم انتشار الشوائب باستخدام عملية التطويق المستمر (continous-belt process) (مرجع



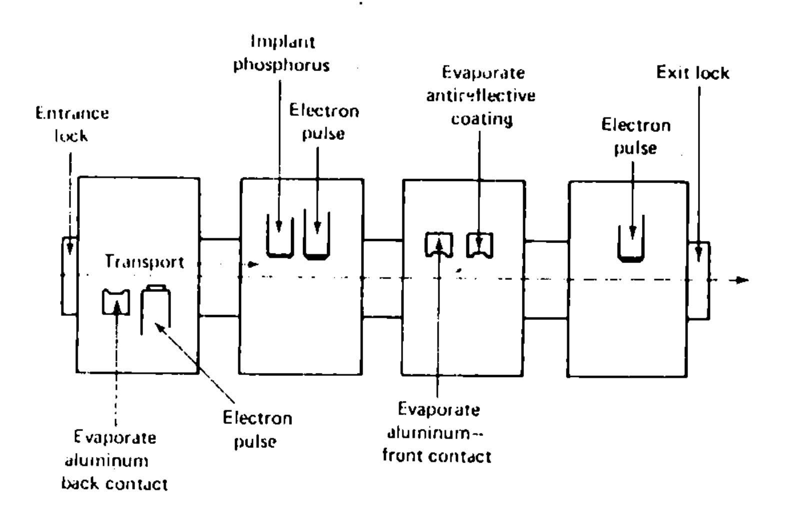
الشكل **7.5** طريقة الانماء الأفقي أو الزاوية الصغيرة القريبة من الأفق لانتاج شريط سليكوني . يمكن تحضير الأشرطة بمعدلات عالية بهذه الطريقة غير أن السيطرة على الأبعاد كانت مشكلة في الماضي .

7.15) . وهناك تقنية أخرى للوصول الى نفس الهدف تعرف بالغرس الأيوني (Ion implantion) (مرجع 7.16) ففي هذه التقنية تعجل أيونات الشوائب المطلوبة الى سرعة عالية ثم توجه الى سطح الرقيقة فتنغرس في مناطق قريبة من السطح . ويستخدم عملية التلدين الحراري (annealing) لازالة العيوب



الشكل **7.6** يبين سطحاً سليكونا خشناً ببروزات موشورية تحت المجهر الألكتروني . والارتفاع النموذجي للموشور بحدود **10** مايكروناً وقواعد المواشير تكون مربعة وتتكون السطوح الجانبية للمواشير من تقاطع مستويات **(111)** ضمن التركيب لبلوري للسليكون .

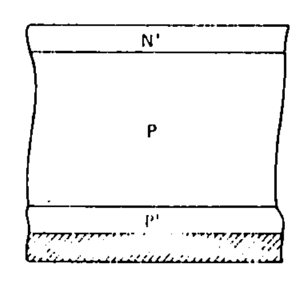
الناتجة في الشبيكة البلورية وتنشط الشوائب كهربائياً . وتتم عملية التلدين بنبضات حرارية اما باستخدام حزمة الكترونية أو بضوء الليزر . ويبين الشكل 7.7 منظومة منتظمة مبنية على تقنية الغرس الايوني وتكون هذه المنظومة بانتاج عال .



الشكل 7.7 الرسم التخطيطي للعمليات المستمرة في الفراغ لانتاج الخلايا الشمسية على اساس الغرس الأيوني وتبخير القطب المعدني والتلدين بنبضات الألكترونية .(After Ref. 716 (c) 1976 IEEE.

ولقد تم الحصول على تحسينات اكثر في اداء الخلية بعد توجيه الاهتمام نحو الحصول على سرعة واطئة لعملية اعادة الاتحاد السطحي في الوصل الخلفي . وكما ذكر في الفصل الخامس ، فإن السرعة الواطئة تُحسّن فولتية الدائرة المفتوحة وبذلك تزيد من نتاج التيار بدرجة جيدة . وان تقنية مجال السطح الخلفي (BSF) (back surface field) هي احدى التقنيات التي تستخدم لتقليل سرعة وفعالية اعادة الاتحاد في السطح الخلفي للخلية الشمسية .

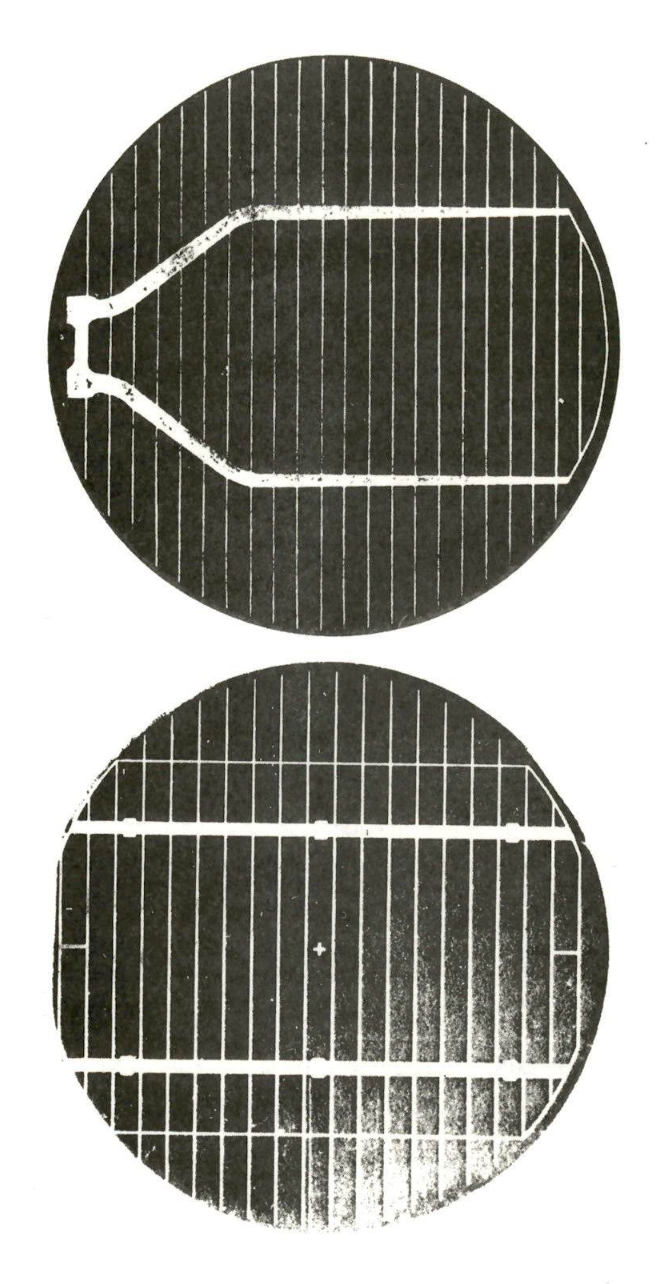
وكما مبين من الشكل 8-7 فإن المناطق المطعمة بتركيز عال تكون على تماس مع الوصل الخلفي . ومن الناحية النظرية فإن السطح البيني بين هذه المنطقة ومنطقة المتن الأقل تطعياً يمكن ان يقلل من سرعة اعادة الاتحاد . وإن هذه التقنية لا تعمل على زيادة فولتية وتيار الخلية فحسب بل تجعلها سهلة التوصيل بوصل أومي ذي المقاومة الواطئة عند السطح الخلفيَ للخلية . اما من الناحية العملية ، تقنياً الاكثر كفاءة لعمل مجال السطح الخلفي هذا هو طبع وترسيب شبكة من الالمنيوم على



الشكل 7.8 مخطط توضحي للخلية الشمسية من نوع N^+PP^+ والمناطق المطعمة بالتركيز العالي عند السطح الخلفي للخلية يحضر سريان حاملات الأقلية . ومفرق PP^+ يعمل كسطح ذي سرعة اعادة اتحاد عالية .

السطح الخلفي لرقيقة السليكون ثم العمل على مزج (alloy) الألمنيوم مع السليكون بعملية التلدين الحراري .

ان عملية التعدين التي تم وصفها في الفصل السادس تعتبر احدى جوانب الضعف في التقنية القياسية . وتستخدم في الوقت الحاضر تقنيتان اقتصاديتان في صناعة الخلايا التجارية وهما :
الطبع (screen printing) والطلاء بالكهرباء (electroplating) وهاتان التقنيتان تحولان دون تبديد معدن المنيوم ولا تستخدم فيها اجهزة التفريغ الباهظة التحسن يستخدم في التقنية الاولى عجينة تحتوي على المعدن الموصل وتثبت على سطح الخلية باستخدام قناع مشبك ويتم ازالة المادة الماسكة في العجينة بعملية الشوي والتي تقلل من مقاومية المعدن ايضاً وتستخدم عجينة الفضة تجارياً في وقت الحاضر ، على الرغم من ان عجينة النيكل والمنيوم والنحاس أقل كلفة : اما في تقنية الطلاء بالكهرباء فيحضر نموذج التوصيل من خلال طبقة عازلة على سطح الخلية ثم يطلى النموذج بطبقة من المعدن المطلوب . ويتم الطلاء عادة بطبقات متتالية من المعادن ، حيث هناك عدد قليل من المعادن لها قابلية الالتصاق بالسليكون ومقاومة جيدة للتآكل ومقاومية واطئة وكلفة رخيصة . والخطوة الاخيرة في عملية التعدين هي التغطيس في اللحام (solder dipping) حيث تعطي هذه العملية طبقة مانعة للتآكل وتقلل من مقاومية المعدن ايضاً ، ويعرض الشكل 9-7 مقارنة بين المظهر الخارجي للتوصيل (القطب) العلوي للخلايا بطريقة التغطيس في اللحام وطبع الشبكة .



الشكل 9-7 تعدين القطب العلوي للخلايا الشمسية بقطر **10**سم فالشكل العلوي تم عمله بعملية التغطيس في اللحام اما الشكل السفلي فبعملية طبع الشبكة .

ان طريقة الرئيسة المستخدمة في عمل الطلاء غير العاكس تبدو مناسبة من حيث الكلفة ومع ذلك يمكن الاستغناء عنها عند تخشين السطح بمواشير صغيرة عليه . ولقد ظهر حديثاً مكائن ذاتية لربط الخلايا وتغليفها على شكل لوح شمسي .

7.5 تحليل نتائج المصانع المختارة

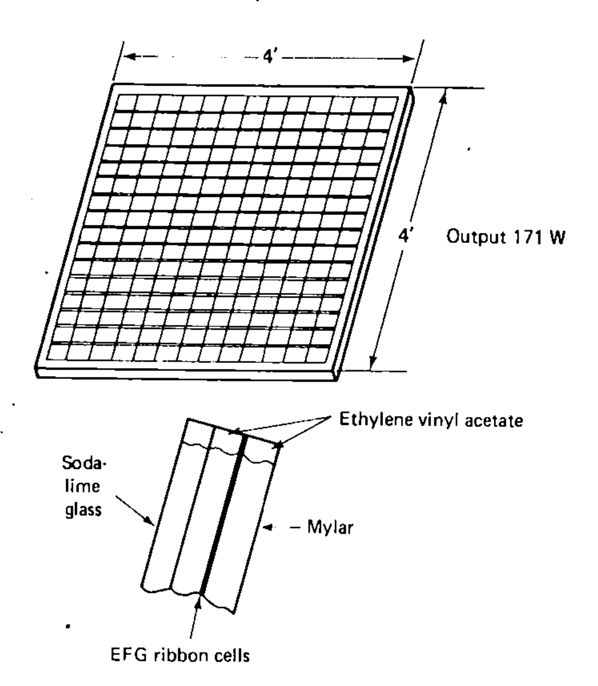
ANALYSIS OF CANDIDATE FACTORIES

في الفقرات السابقة تم وصف طرائق مختلفة لصناعة الخلايا الشمسية حتى نحصل على اساس مشترك للمقارنة بين هذه الطرائق من الناحية الاقتصادية وقد تم تطوير تقنية لحساب الكلفة المسماة بساميكس (SAMICS) (Solar Array Manufactring Industry Costing Standard) (مرجع 7.8) . وبالاعتماد على هذه التقنية واستخدام برامج الحاسبة الالكتروني صار ممكناً الحصول على افضل حسابات الكلفة واكثرها توثيقاً وصحة لكل مرحلة من المراحل المتتالية في صناعة الخلايا الشمسية .

ولقد صممت مصانع ذات سعات عالية على اساس الجمع بين التقنيات المذكورة في هذا الفصل وتم مقارنة كلفة الالواح الشمسية المنتجة في هذه المصانع باستخدام منهج ساميكس . وتبين من النتائج ان المصانع المبنية على الجمع بين هذه التقنيات تكون قادرة على انتاج الواح شمسية بنفقات تمكنها من التنافس مع مولدات الطاقة في بعض التطبيقات ذات المجال الواسع والتي ستذكر في الفصل الرابع‌عشر . ان عملية (EFG) وعملية نمو الغشاء بين الاوتاد المتوازية اضافة الى طريقة المبادل الحراري (HEM) وتقطيع الرقائق الناتجة . تتضح قابلية هذه التقنيات كلها على انتاج الرقائق السليكونية بمقارنتها مع تقنية جوكرالسكي المتطورة التي تأتي في المؤخرة حتماً .

وكمثال للمصنع الآلي الذي ينتج الالواح الشمسية بكلفة قليلة يمكن تحليل نتائج ذلك المصنع بطريقة (SAMICS) التي تم وصفها في (مرجع 7.19) . والالواح المنتجة في هذا المصنع بابعاد 1.2 × 1.2 متر وتشتمل على 192 خلية مصنعة على شريط EFG حيث تكون الخلية بابعاد 10 × 7.5 سم كما موضح في الشكل 7.10 وتكون كفاءته 11.4% .

ان العمليات المتتالية المستخدمة لانتاج اللوح الشمسي مبينة في الشكل 7.11 واستخدمت عملية كاربيديونين (Union Carbide) لاستخلاص معدن السليكون . وتم تحضير الصفيحة السليكونية من الخام بطريقة EFG وقطعت الى الاحجام

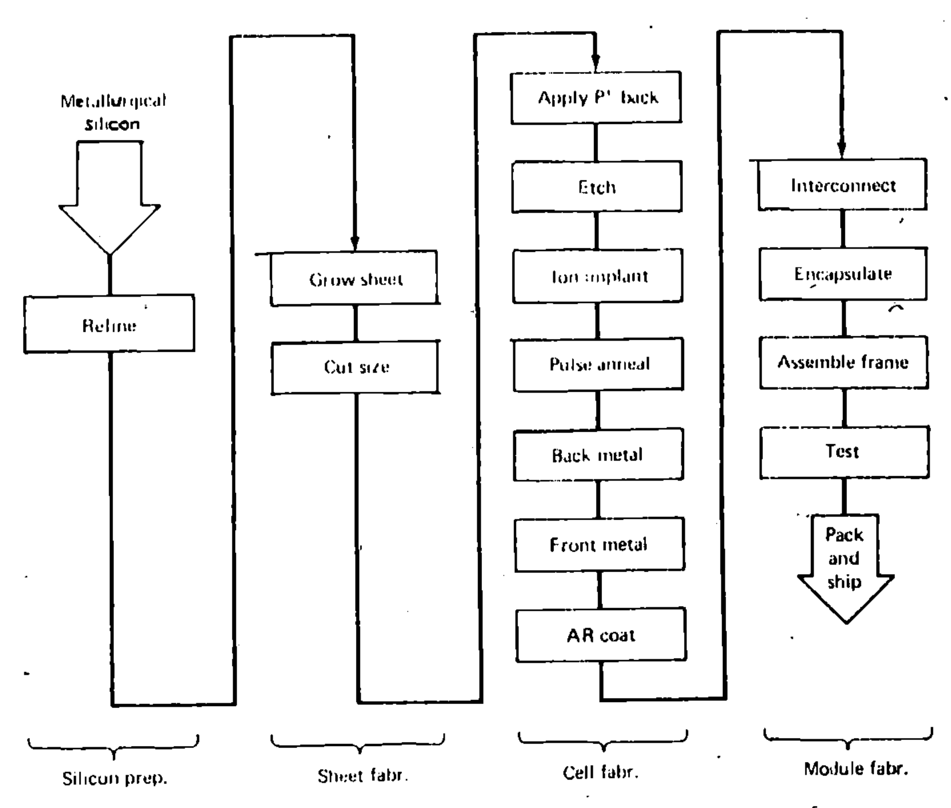


الشكل 10-7 لوح الخلية الشمسية المنتجة في المصنع المختار الذي وصف في متن الكتاب .

المطلوبة . فالمميزات الرئيسة لصناعة الخلية بهذه التقنية هي استخدام مجال السطح الخلفي وتخشين السطح بالبروزات الموشورية وعملية الغرس الايوني وتتبعه عملية التلدين النبضي وطبع الشبكة لعمل القطب العلوي . وبعد ذلك تغلف الخلية وتختبر .

وللحصول على التكاليف الواطئة المذكورة يجب ان يكون حجم الانتاج بهذه التقنية بحدود $(250\ MW_p/Yr)$ ومتطلبات العمل والمساحة اللازمة لمختلف مراحل تصنيع اللوح الشمسي مبينة في الشكل 7.12 . والفترة اللازمة لكي تعوض الالواح الطاقة المصروفة في مراحل التصنيع المتتالية تقدر بحوالي 65 يوم عمل .

والشكل 13-7 يبين حجم ومخطط لمختلف مراحل الانتاج في المصنع المختار بانتاج $250\ MW_p/yr$. والشكل (a) 7.13 يبين التصميم المطلوب بقسم تحضير الشريط السليكوني . اما الشكل (b) 13-7 فيبين المواقع المتعلقة بصناعة الخلية وتغليفها واختبارها .



الشكل 7-11 العمليات المتعاقبة والمستخدمة في انتاج اللوح الشمسي الموضح في الشكل 7-10 (مرجع 7-19)

ADM

Silicon refinement 40,800 ft²

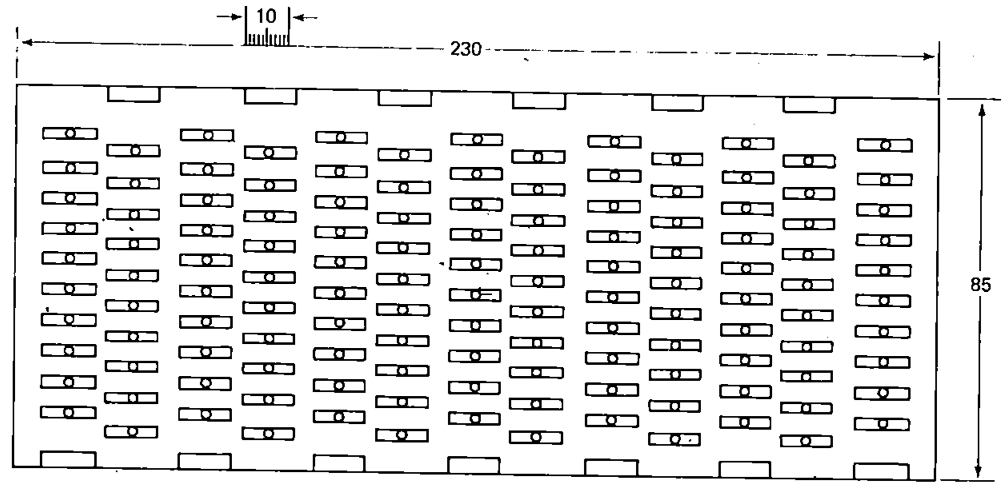
Sheet, cell, and module fabrication 91,630 ft²

Production rate (W/yr)	250,000,000
Labor force (all shifts)	1,152 direct 529 indirect
Factory area (ft²)	
Silicon refinement	40,800
Sheet growth	19,550
Cell fabrication	31,200
Module fabrication	10,200
Warehouse	9,779
Misc. (aisles, shops, cafeteria, etc.)	20 901
Capital equipment ($)	
Silicon refinement	19,400,000 *
Sheet growth	14,820,000
Cell and module fabrication	8,219,000

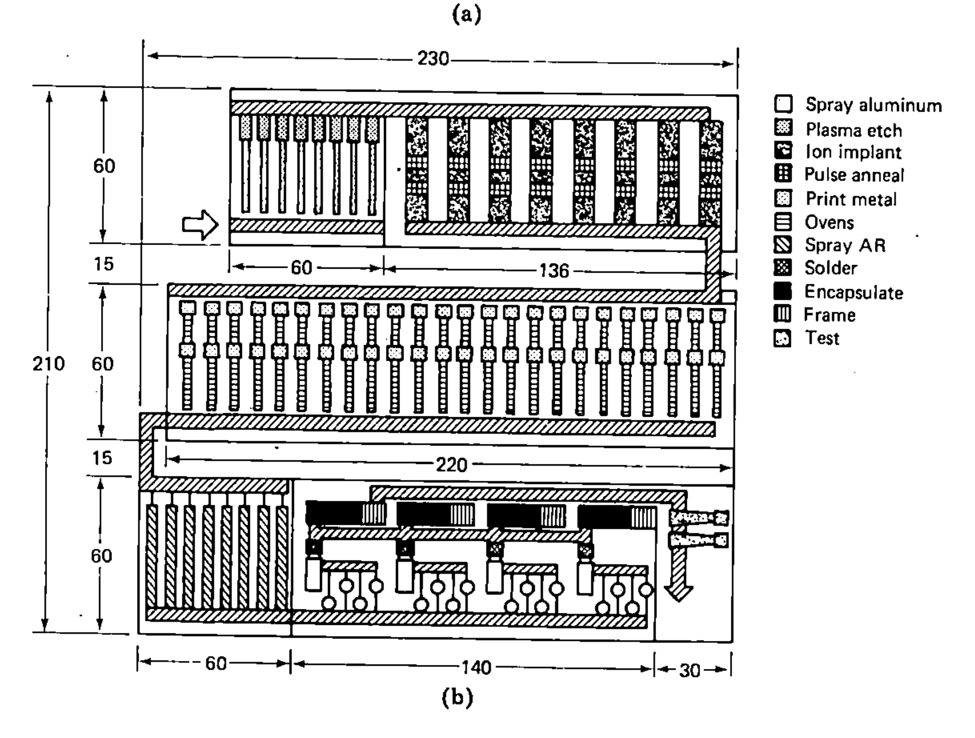
*Union Carbide

Energy payback time sheet, cell, and module 0.179 year

الشكل 7-12 حساب المساحة وتكاليف العمل ورأس المال اللازم (بالدولار الامريكي عام 1976) لانتاج الخلايا بسعة 250 ميكاواط ذروة لكل عام،MW_p/yr وحساب سعر البيع للوح الشمسي (مصنع F.O.B) وبـ (0.46 دولار) لكل W_p وبنفس الوحدات النقدية (من مرجع 7.19) .



(a)



(b)

الشكل (13-7) (a) المظهر الخارجي لوجبة من شريط بلوري منتج من المصنع المختار ففي كل وجبة تنتج خمسة اشرطة دفعة واحدة مستخدماً طريقة EFG (الابعاد بالاقدام) . (b) المظهر الخارجي لعمل الخلية والتغليف وقسم اختبار الخلية (من مرجع 7.19) .

6-7 الخلاصة SUMMARY

لقد ظهرت عدة تقنيات متقدمة لانتاج الالواح الشمسية السليكونية باسعار قليلة ووضعت هذه التقنيات حلاً للمشاكل الخاصة بالتقنية القياسية التي تم وضعها في الفصل السادس .

ان الانماء المباشر للاشرطة السليكونية يساعد على التخلص من قطع الرقائق والذي يعتبر نقطة الضعف في تقنية القالب والنتائج الرئيسة المطلوبة في تقنيات الخلايا المصنعة على الرقائق السليكونية هي ان يكون الانتاج ذاتياً (آلياً) ودقيقة وان تقلل من تبديد المواد المستخدمة . وقد حققت عدة تفنيات هذ المتطلبات . ويبين التحليل الاقتصادي للمصانع المختارة للانتاج والمبينة في معالجات متقدمة ومتتالية قابليتها على انتاج الواح الخلايا الشمسية وباسعار تجعلها تتنافس مع مصادر الطاقة التقليدية المنتجة للكهرباء على الاقل في بعض التطبيقات الارضية . وتقنية الاغشية الرقيقة التي تم وصفها في الفصل التاسع يقلل من استخدام كمية المادة المطلوبة لخلايا الفوتولطائية ولهذا السبب يجري محاولات اخرى ، غير التي مبينة في السليكون لبلوري التي تم شرحها في هذا الفصل ، ستحقق حتماً الانتاج بكلفة قليلة في السنوات القادمة .

تمارين

7.1، الكثافة الحجمية لذرات السليكون في بلورة السليكون بحدود 5×10^{28} سم$^{-3}$ طبقاً للشكل 1-7 . فكم جزءاً من البليون من الشوائب التالية يسمح لها ان تكون في مادة الخلايا الشمسية القياسية دون ان تقلل من ادائها اكثر من 10% ؟
(a) Mo, (b) Ti, (c) Cu.

7.2· (a) من المتوقع الحصول على احسن اداء في الانتاج بوضع تقنية متقدمة للتقطيع لانتاج شرائح بسمك 250 مايكرون وبخسارة 150 مايكرون كبرادة باستخدام هذه التقنية فما هي اكبر مساحة يمكن الحصول عليها من كغم واحد من خام السليكون بفرض انه لا يمكن الاستفادة من البرادة ثانية باستخدام هذه التقنية .
(b) ما النتيجة المناظرة من تقنية الشرائط السليكونية التي تنتج شرائط بسمك 100 مايكرومتر ؟
(c) الخلايا المصنوعة من المادة المنتجة بالطرائق السابقة ذكرها لها كفاءة التحويل 60% و 12% على التوالي وتحت شمس ساطعة 1 kW/m^2 أوجد قيمة اقصى سعة لتوليد القدرة لكل من التقنيات المذكورة اعلاه بوحدات (Peak Watts/kg) (a) اذا كان السليكون النقي الذي يمكن تحضيره من خام السليكون هو 1000 مليون كيلوغرام سنوياً فكم يكون اقصى سعة للانتاج سنوياً للخلايا الشمسية لكل من التقنيات المذكورة اعلاه .

7.3·احسب اعلى كثافة الرص (كثافة الخلية الى مساحة اللوح) التي يمكن الحصول عليها من رص الخلايا الدائرية في لوح شمسي مستطيل .

REFERENCES

المراجع

[7.1] J. R. DAVIS et al., "Characterization of the Effects of Metallic Impurities on Silicon Solar Cell Performance," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D.C.*, 1978, pp. 490-496.

[7.2] C. L. YAWS et al., "New Technologies for Solar Energy Silicon: Cost Analysis of UCC Silane Process," *Solar Energy 22* (1979), 547-553.

[7.3] C. L. YAWS et al., "New Technologies for Solar Energy Silicon: Cost Analysis of BCL Process," *Solar Energy 24* (1980), 359-365.

[7.4] G. F. FIEGL AND A. C. BONORA, "Low Cost Monocrystalline Silicon Sheet Fabrication for Solar Cells by Advanced Ingot Technology," *Conference Record, 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego*, 1980, pp. 303-308; A. H. KACHARE et al., "Performance of Silicon Solar Cells Fabricated from Multiple Czochralski Ingots Grown by Using a Single Crucible," *Conference Record, 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego*, 1980, pp. 327-331.

[7.5] J. C. POSA, "Motorola Pulls Square Ingots," *Electronics*, October 11, 1979, p. 43.

[7.6] H. FISCHER AND PSCHUNDER, "Low Cost Solar Cells Based on Large Area Unconventional Silicon," *Conference Record, 12th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Baton Rouge*, 1976, pp. 86-92; J. LINDMAYER AND Z. C. PUTNEY, "Semicrystalline versus Single Crystal Silicon," *Conference Record, 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego*, 1980, pp. 208-213.

[7.7] C. P. KHATTAK AND F. SCHMID, "Low-Cost Conversion of Polycrystalline Silicon into Sheet by HEM and Fast," *Conference Record, 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego*, 1980, pp. 484-487.

[7.8] R. W. ASTER, "PV Module Cost Analysis," in *LSA Project Progress Report 13 for Period April 1979 to August 1979*, DOE/JPL-1012-29, pp. 3-385 to 3-395.

[7.9] K. V. RAVI, "The Growth of EFG Silicon Ribbons," *Journal of Crystal Growth 39* (1977), 1-16.

[7.10] J. P. KALEJS et al., "Progress in the Growth of Wide Silicon Ribbons by the EFG Technique at High Speed Using Multiple Growth Stations," *Conference Record, 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego*, 1980, pp. 13-18.

[7.11] R. G. SEIDENSTICKER, "Dendritic Web Silicon for Solar Cell Application," *Journal of Crystal Growth 39* (1977), 17-22.

[7.12] T. KOYANAGI, "Sunshine Project R and D Underway in Japan," *Con-*

ference Record, 12th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Baton Rouge, 1976, pp. 627-633; D. N. JEWETT AND H. E. BATES, "Low Angle Crystal Growth of Silicon Ribbon," *Conference Record, 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego*, 1980, pp. 1404-1405.

[7.13] D. J. ROWCLIFFE AND R. W. BARTLETT, "Vacuum Die Casting of Si Sheet," in *LSA Progress Report 13 for Period April 1979 to August 1979*, DOE/JPL-1012-39, pp. 3-152 to 3-154.

[7.14] S. R. CHITRE, "A High Volume Cost Efficient Production Macrostructuring Process," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D.C.*, 1978, pp. 152-154.

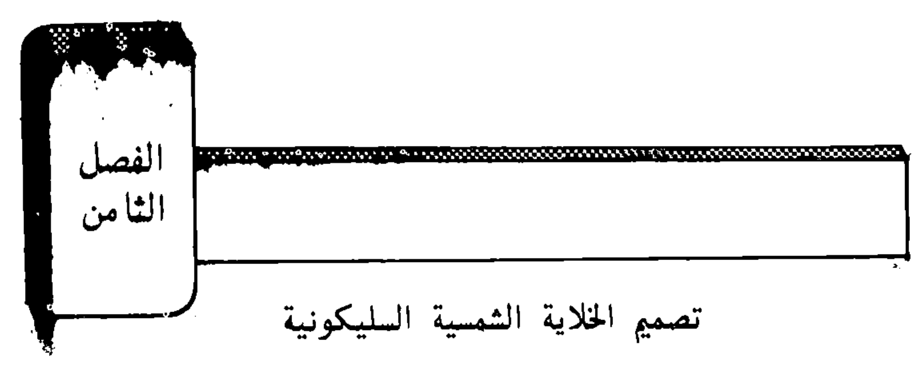
[7.15] N. MARDESICH et al., "A Low-Cost Photovoltaic Cell Process Based on Thick Film Techniques," *Conference Record, 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego*, 1980, pp. 943-947.

[7.16] A. KIRKPATRICK et al., "Silicon Solar Cells by Ion Implantation and Pulsed Energy Processing," *Conference Record, 12th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Baton Rouge*, 1976, pp. 299-302; also "Low-Cost Ion Implantation and Annealing Technology for Solar Cells," *Conference Record, 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego*, 1980, pp. 820-824.

[7.17] H. SOMBERG, *Automated Solar Panel Assembly Line*, report prepared for Jet Propulsion Laboratory, Report No. DOE/JPL/955278-1, April 1979, and subsequent reports.

[7.18] R. G. CHAMBERLAIN, "Product Pricing in the Solar Array Manufacturing Industry: An Executive Summary of SAMICS," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D.C.*, 1978, pp. 904-907.

[7.19] J. V. GOLDSMITH AND D. B. BICKLER, *LSA Project—Technology Development Update*, report to U.S. Department of Energy by Jet Propulsion Laboratory, DOE/JPL-1012-7, August 1978 (JPL Pub #79-26); also D. B. BICKLER, "A Preliminary 'Test Case' Manufacturing Sequence for 50^c/Watt Solar Photovoltaic Modules in 1986," *Proceedings of Second E. C. Photovoltaic Solar Energy Conference* (Utrecht: D. Reidel Publishing Co., 1979), pp. 835-842.



تصميم الخلاية الشمسية السليكونية

DESIGN OF SILICON SOLAR CELLS

8.1. المقدمة INTRODUCTION

تم في الفصلين السابقين وصف التقنية القياسية والتقنية المحسنة لصناعة الخلاية الشمسية السليكونية . اما في هذا الفصل فسنناقش القضاية المتعلقة بالتصميم التفصيلي للخلايا السليكونية والاجابة عن التساؤلات مثل : ماهو افضل مستوى للتصميم في جانبي المفرق؟ ما الموقع المثالي للمفرق واين؟ وما الشكل الافضل للقطب المعدني العلوي في الخلية ؟ كيف نستطيع خفض الخسائر البصرية للخلية الى ادنى حد ممكن؟ ولو ان الاجوبة ستكون عن الخلايا السليكونية غير ان هذه الاجوبة ستأخذ المواد الخلايا المصنعة من مواد أخر والتي ستذكر في الفصل العاشر بصورة متوازية .

8.2 الاعتبارات الرئيسة MAJOR CONSIDERATIONS

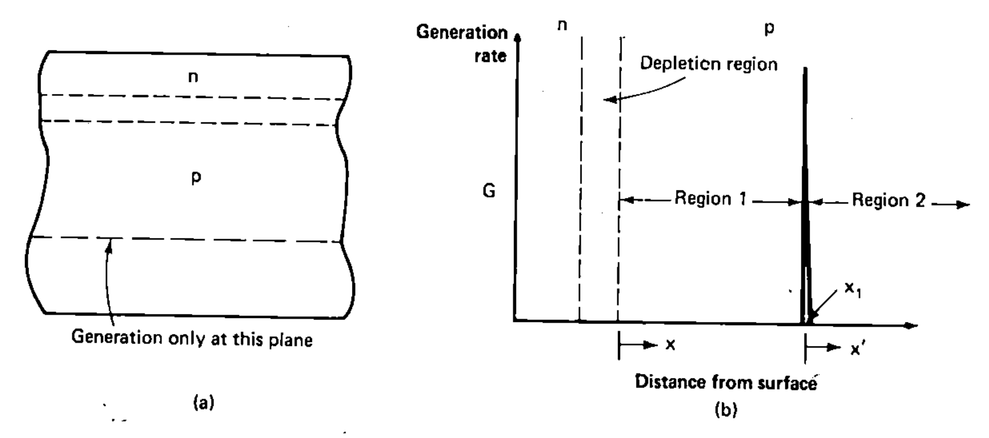
8-2.1- احتمالية تجميع الحاملات المولدة

Collection Proability of Generated Carriers

احتمالية التجميع (collection probability) هي عامل يعتمد على الموقع داخل الخلية ويعرف هذا العامل بأحتمالية مساهمة حاملات الاقلية المتولدة ضوئياً في تيار الدائرة القصيرة للخلية الشمسية وهي دالة للموقع الذي تتولد عنده الحاملات داخل الخلية . وهذه الدالة مهمة وجوهرية في تصميم الخلايا الشمسية من الناحية الفيزيائية .

ولايجاد احتمالية التجميع ، ناخذ حالة فرضية ، كما في الشكل (a) 8.1 ، لتحليل خلية سليكونية ونفترض ان ازواج الكترون ـ فجوة تتولد فقط عند

نقاط تقع على مستوى واحد على اطوال الخلية . يمكن تحليل معدل التولد كدالة للمسافة (في بعد واحد) خلال الخلية عند التناظر، وتكون دالة نبضية كما مبين في الشكل 8.1(b) .



الشكل 8.1 استخدمت الظروف المثالية لتوليد حاملات الشحنة في حساب احتمالية التجميع . والعلاقة الرياضية لجزء من الحاملات المتولدة عند نقطة x والتي تسهم في تيار الدائرة القصيرة مذكورة في متن الكتاب .

ان الهدف من التحليل هو ايجاد نسبة الالكترونات المتولدة عند نقطة x_1 التي تساهم في تيار الدائرة القصيرة . ومن خلال التحليل يتبين ان المسألة خطية (linear) وباستخدام مبدأ التراكب (supper position) يمكن ان تطبق النتائج على الحالات عندما يكون شكل معدل التوليد مماثل الى حد ما للحالات الواقعية وهذا قريب الى التحليل المذكور في الفقرة (4.6). في المنطقة 1 من الشكل (b) 8.1 يكون معدل التوليد صفراً الا في نقطة x_1 الواقعة على يمين حافة المنطقة . والمعادلة التفاضلية التي تطبق على حاملات الاقلية الاضافية تكون مشابهة للمعادلة (4.25)

أي

$$\frac{d^2\Delta n}{dx^2} = \frac{\Delta n}{L_e^2} \tag{8.1}$$

حيث L_e هو طول الانتشار (diffusion length) والحل العام لهذه المعادلة كما ذكر سابقاً هو

$$\Delta n = Ae^{x/L_e} + Be^{-x/L_e} \qquad (8.2)$$

ولتعين قيم الثوابت A و B نأخذ الشروط الحصرية عند الدائرة القصيرة ، فالزيادة في تركيز الالكترونات عنده $x = 0$ تساوي صفراً اذان قيمتها تتحد بواسطة الفولتية المسلطة عبر المفرق ولذا فان

$$\Delta n = A(e^{x/L_e} - e^{-x/L_e}) = 2A \sinh\left(\frac{x}{L_e}\right) \qquad (8.3)$$

وبالطريقة نفسها في المنطقة 2 من الشكل (b) 8.1

$$\Delta n = Ce^{x'/L_e} + De^{-x'/L_e}$$

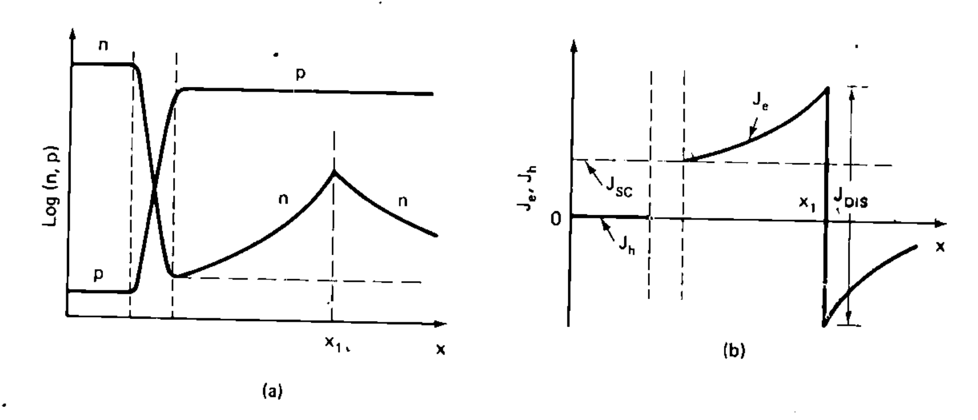
حيث يبدأ الاتجاه x' عند النقطة x_1 وفي هذه الحالة تكون الزيادة في التركيز محدودة عندما يصبح x' كبيراً ولذا $C = 0$ و

$$\Delta n = De^{-x'/L_e} \qquad (8.4)$$

وعند نقطة x_1' ويجب ان تكون المعادلتان 8.3و 8.4 متوائمتين لان تركيز الالكترونات يكون متواصلا ، ولذا

$$D = 2A \sinh\left(\frac{x_1}{L_e}\right) \qquad (8.5)$$

[illegible]كون معدل التوليد على جانب نوع n من المفرق صفراً لان التوليد [illegible] [illegible]نطة x_1 فقط . كما ان الزيادة في تركيز الفجوات Δp تساوي صفراً [illegible] منطقة الاستنزاف عندما تكون الخلية دائرة قصيرة .
و[illegible]ي ان Δp تساوي صفراً على امتداد هذه المنطقة . والتوزيعات النهائية لل[illegible]ات والفجوات موضحة في الشكل (a) 8.2 وبما ان سريان حاملات الاقلية في [illegible]طق شبه المتعادلة (quasi-neutral regions) المنتظمة التطعيم يكون [illegible] الانتشار غالبا (الفقرة 4.5) ، فان حساب سريان تيار حاملات الا[illegible] [illegible]كون بسيطاً وذلك باجراء التفاضل لمعادلات التوزيع المذكورة اعلاه . وال[illegible] النهائية موضحة في الشكل (b) 8.2.



الشكل 8.2(a) توزيع الحاملات في الخلية الشمسية حسب الشروط الخاصة بالشكل 8.1.(b) توزيع تيار حاملات الاقلية المناظرة.

ويظهر ان عدم التواصل في كثافة التيار الالكتروني عند النقطة x_1 ناجم عن توليد حاملات عند هذه النقطة وان الفرق في التيار عند النقطة يساوي الشحنة الالكترونية مضروبة بمعدل التوليد عند هذه النقطة. وبفرض حدوث تغير طفيف في التيار خلال منطقة الاستنزاف (كما ذكر في الفقرتين (4.6.2, 4.6.3) فان كثافة التيار الكلي في الثنائي تساوي كثافة تيار الالكترونات عند $x = 0$ وان احتمالية التجميع (f_c) ماهي الا النسبة بين معدل سريان الحاملات في الدائرة الخارجية ومعدل التوليد اي ان :

$$f_c = \frac{J_{SC}}{J_{DIS}} \qquad (8.6)$$

الا ان J_e في منطقة-p هي :

$$J_e = qD_e \frac{dn}{dx} \qquad (8.7)$$

ولذا في المنطقة 1 تكون :

$$J_e = \frac{2qD_e A}{L_e} \cosh\left(\frac{x}{L_e}\right) \qquad (8.8)$$

والتي تعطي عنده $x = 0$

$$J_{SC} = \frac{2qD_e A}{L_e} \qquad (8.9)$$

ومن الممكن ايجاد J_{DIS} بايجاد علاقتين لسريان التيار على جانبي نقطة اللااستمرارية J_{e-} and J_{e+}

$$J_{e-} = \frac{2qD_e A}{L_e} \cosh\left(\frac{x_1}{L_e}\right) \qquad (8.10)$$

$$J_{e+} = \frac{-qD_e D}{L_e} = \frac{-2qD_e A}{L_e} \sinh\left(\frac{x_1}{L_e}\right) \qquad (8.11)$$

وينتج المعادلة الاخيرة من المعادلتين 8.5 و 8.7 ولذا :

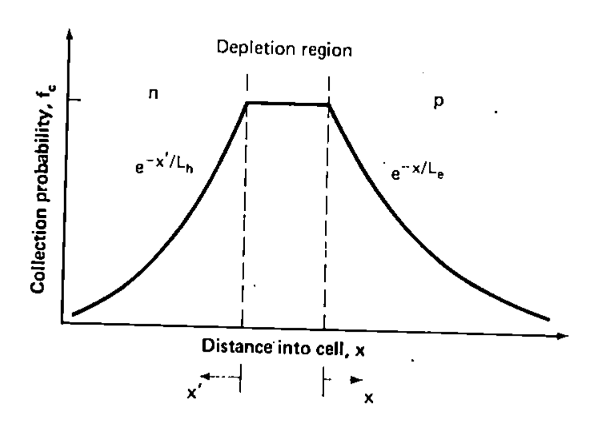
$$\begin{aligned} J_{DIS} &= J_{e-} - J_{e+} \\ &= \frac{2qD_e A}{L_e}\, e^{x_1/L_e} \end{aligned} \qquad (8.12)$$

ومن هذا فان

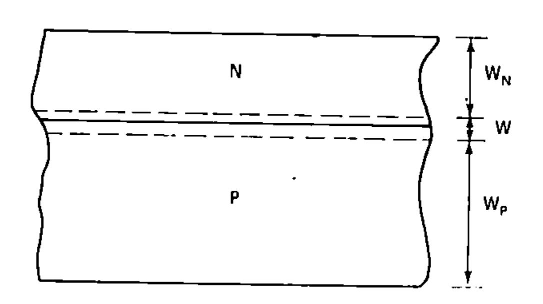
$$\boxed{f_c = e^{-x_1/L_e}}$$

تتناقص احتمالية التجميع اسياً مع ازدياد المسافة بين نقطة التوليد وحافة منطقة الاستنزاف للمفرق . وان الطول المميز (characteristic length) للاضمحلال يساوي طول انتشار حامل الاقلية . وبما ان التحليل السابق خطي فان هذا الاستنتاج يكون صحيحاً بالرغم من توزيع معدل التوليد للحاملات على امتداد الثنائي .

يبين الشكل 8.3 احتمالية التجميع كدالة للمسافة خلال الخلية الشمسية وكما افترضنا سابقا (الفقرة 4.7) . ان منطقة الاستنزاف وجزءاً من الخلية الواقعة ضمن انتشار حامل الاقلية هي المناطق التي يملك اعلى فرصة للاسهام في سريان التيار (اي تجميع) اما حاملات الاقلية المتولدة خارج هذه المناطق فان فرصة اعادة اتحادها ثانية قبل الوصول الى المفرق ومن ثم اقطاب الخلية عالية جداً .



الشكل 8.3 احتمالية التجميع المحسوبة لحاملات الاقلية المتولدة كدالة لنقطة في الخلية الشمسية .



الشكل .8.4 الابعاد الحرجة في الخلية ذات الابعاد المحدودة

وفي التحليل السابق افترضنا ضمنياً ان كلا من منطقة النوع -n والنوع -p تمتد مسافة ابعد بكثير من مسار الانتشار من المفرق . وبالنسبة للخلايا الحقيقية ذات الابعاد المحدودة كما موضح في الشكل 8.4 فان احتمالية التجميع تاخذ شكلا اخر . ومثال على ذلك عندما يكون للسطح على جانب -p من النبيطة سرعة اعادة اتحاد عالية فان العلاقة الرياضية المناظرة للمعادلة 8.13 تكون :

$$\frac{\sinh[(W_P - x)/L_e]}{\sinh(W_P/L_e)} \qquad (8.14)$$

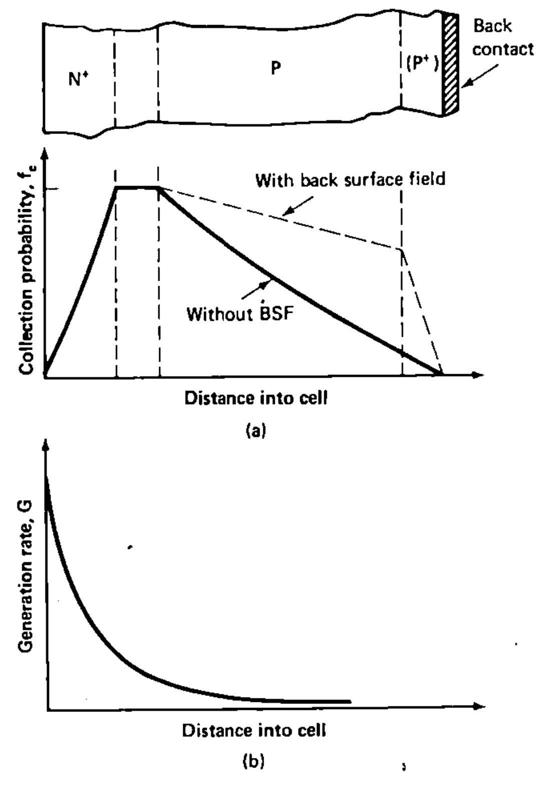
اما اذا كانت سرعة اعادة الاتحاد واطئة فتكون :

$$f_c = \frac{\cosh [(W_P - x)/L_e]}{\cosh (W_P/L_e)} \qquad (8.15)$$

وكلا المعادلتين اعلاه تقتربان من المعادلة 8.13 عندما $W_P >> L_e$

8.2.2 عمق المفرق Junction Depth

السطوح المكشوفة كالتي بين اصابع القطب المعدني عند السطح العلوي للخلية الشمسية تمتلك عموما سرعة اعادة اتحاد عالية . والسطوح البينية (Interface) بين التوصيلات الاومية وشبه الموصلة تكوّن ايضا مناطق سرعة عادة اتحاد عالية . ولقد



الشكل 8.5 (a) احتمالية التجميع لخلية محدودة الابعاد مع مجال السطح الخلفي وبدونه . (b) الرسم التخطيطي يبين معدل التوليدلزوج الكترون-فجوة كدالة للمسافة الى داخل الخلية عند اضائتها بضوء الشمس .

تبين في الفقرة 7.4 ، ان الطريقة الوحيدة لخلق سطح بيني ذي سرعة اعادة اتحاد واطئة هي تكوين مجال السطح الخلفي (Back Surface Field) (وذلك بتكوين مفرق يجمع منطقة مطعمة بدرجة عالية مع منطقة مطعمة بدرجة واطئة والنوع نفسه من الشائب) .

مما ذكر سابقاً واشارة الى المعادلتين 8.14 و 8.15 فان إحتمالية التجميع f_c للحاملات المتولدة بدلالة المسافة من سطح الخلية الشمسية p-n تكون في الشكل 8.5.(a) . فالسمتان المهمتان لهذا الشكل هما : أن مجال السطح الخلفي يحسّن احتمالية التجميع للحاملات المتولدة قرب القطب الخلفي وهذا بدوره يزيد من تيار الدائرة القصيرة للخلية . واحتمالية التجميع ، للحاملات المتولدة قرب السطح العلوي ، واطئة .

وبأخذ المعدل الحقيقي لتوليد الحاملات في شبه الموصل عند اضاءته بضوء الشمس فإن أقصى معدل توليد يحدث مباشرة عند سطح شبه الموصل . وبالنسبة للضوء احادي اللون فإن معدل التوليد يكون :

$$G = (1 - R)\,\alpha N e^{-\alpha x} \qquad (8.16)$$

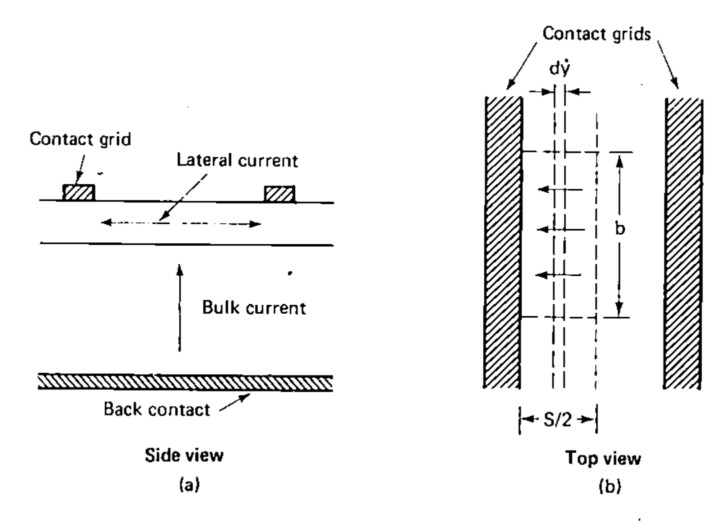
حيث x تمثل المسافة (العمق) تحت السطح العلوي و α هو معامل الامتصاص و N فيض الفوتونات الساقطة و R هو جزء الضوء المنعكس . اما بالنسبة لضوء الشمس فإن معدل التوليد يصبح

$$G(x) = \int_0^{\lambda_{max}} [1 - R(\lambda)]\,\alpha(\lambda)\,N'(\lambda)\,e^{-\alpha(\lambda)x}\,d\lambda \qquad (8.17)$$

حيث $N'(\lambda)$ هو فيض الضوء الساقط لوحدة الطول الموجي . وإن الشكل التقريبي لهذه الدالة الأسية مبين في الشكل 8.5.(b) ولمعدل التوليد G ذروة قوية جداً قرب السطح وبصورة دقيقة عندما تكون احتمالية التجميع واطئة ويمكن تقليل اثر هذا الخلل بجعل المفرق قريباً من السطح .

8.2.3 المقاومة العرضية للطبقة السطحية
Lateral Resistance of Top Layer

يكون سريان التيار في متن الخلية عمودياً على سطح الخلية كما مبين في الشكل 8.6(a) ومن أجل جمع التيار بواسطة شبكة القطب العلوي التي تغطي سطح الخلية جزئياً يجب ان يسري التيار بصورة عرضية خلال الطبقة السطحية من مادة الخلية . وبالنسبة لطبقة نوع n- المطعم بصورة منتظمة ، فإن المقاومية لهذه الطبقة تكون وفق المعادلة التالية (الفقرة 2.14)



الشكل 8.6 (a) اتجاه سريان التيار في مناطق مختلفة لمفرق p-n (b) الخسارة بسبب المقاومة العرضية للطبقة السطحية .

$$\rho = \frac{1}{q\mu_e N_D} \qquad (8.18)$$

ان المعامل الانسب لوصف المقاومة العرضية لطبقة n- هو المقاومية الصفيحية (sheet resistivity) (ρ_s) والتي تساوي المقاومية مقسومة على سمك الطبقة t أي

$$\rho_s = \frac{1}{q\mu_e N_D t} \qquad (8.19)$$

وبالنسبة للطبقة المطعمة بصورة عشوائية ، فإن المقدار $\mu_e N_D t$ يعوض عنه بالتكامل $\int_0^t \mu_e(x) N_D(x)\, dx$. والمقاومية الصفيحية تقاس عادة بوحدات اوم/ مربع ويرمز لها بالشكل ($\Omega/\square$) .

ان المقاومية الصفيحية للطبقة العليا هي التي تحدد اقل عرض للفاصلة بين خطوط الشبكة للقطب العلوي وبالرجوع الى الشكل 8.b(b) فإن القدرة المفقودة نتيجة سريان التيار العرضي يمكن أن تحسب بسهولة حيث أن هذا الجزء الصفير من القدرة المفقودة dp في مقطع عرضي dy .
يساوي

$$dP = I^2\, dR \qquad (8.20)$$

و dR يساوي $\rho_s dy/b$ و I هو التيار العرضي ويساوي صفراً عند النقطة الوسطية بين خطوط الشبكة ويتزايد خطياً الى أن يصل اعلى قيمة عند الخط الشبكي بوجود اضاءة منتظمة . ولذا

$$I = Jby \qquad (8.21)$$

حيث يمثل J مقدار كثافة التيار في النبيطة وبذا القدرة الكلية المفقودة تساوي :

$$P_{\text{loss}} = \int I^2 dR = \int_0^{S/2} \frac{J^2 b^2 y^2 \rho_s dy}{b} = \frac{J^2 b \rho_s S^3}{24} \qquad (8.22)$$

وعند التعامل مع القدرة القصوى حيث تكون القدرة المتولدة تحت المنطقة التي نحن بصددها $V_{mp} J_{mp} bS/2$. فإن الجزء المفقود في القدرة عند هذا النقطة هو :

$$p = \frac{P_{\text{loss}}}{P_{\text{mp}}} = \frac{\rho_s S^2 J_{\text{mp}}}{12 V_{\text{mp}}} \qquad (8.23)$$

وهذه المعادلة تساعد على ايجاد اقل فسحة S مناسبة من معرفة بعض معامل الخلية الشمسية . وبالنسبة لخلية سليكونية تجارية مثلاً عندما يكون $\rho_s = 40\ \Omega/\square$ ، $J_{mp} = 30\ mA/cm^2$ و $V_{mp} = 450\ mV$ واذا كانت القدرة المفقودة

بسبب تأثيرات المقاومة العرضية لاتزيد على 4% فان :

$$S^2 < \frac{12\, p V_{mp}}{\rho_s J_{mp}}$$

أي

$$S < \left(\frac{12 \times 0.04 \times 0.45}{40 \times 0.03}\right)^{1/2} \text{cm} < 4 \text{ mm} \qquad (8.24)$$

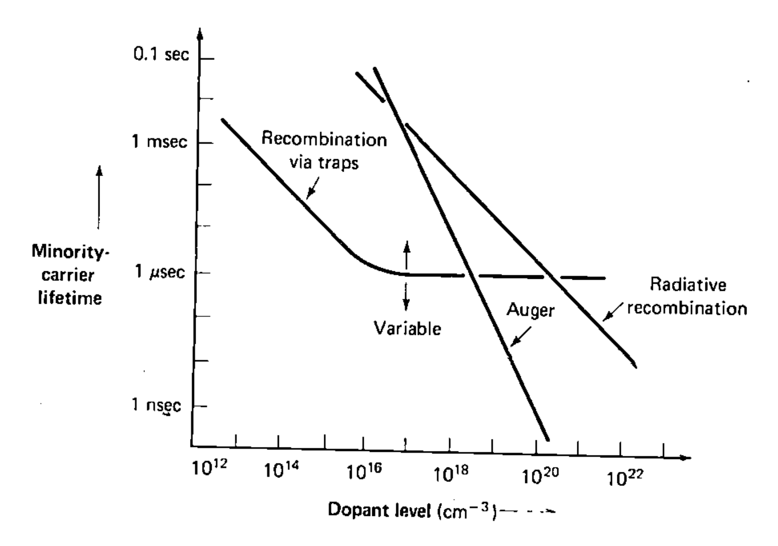
وتتفق هذه النتيجة مع الفسحة الموجودة في اقطاب الخلايا السليكونية التجارية والخلايا التي تملك فسحة اكبر من هذه القيمة تملك المقاومية الصيفحية اصغر اما التي تملك فسحة اصغر فتملك مقاومة الصفيحية اكبر . ومن الناحية العملية فإن العامل الرئيسي المحدد للمقاومية الصفيحية هو عمق المفرق في المعادلة (8.19) . وفي الحقيقة ان حدود التصميم للتقنية المستخدمة في انتاج نمط القطب العلوي هي ان تجعل عمق المفرق اقل مايمكن بالنسبة لسطح الخلية . وللحصول على ادنى مقاومية صفيحية لهذه الطبقة فانها تطعم الى اعلى حد ممكن بالشوائب .

8.3 تطعيم الأرضية DOPING OF THE SUBSTRATE

تطعم الأرضية بالشوائب بصورة منتظمة اثناء تحضير الرقائق من المادة المنصهرة ويتحدد مستوى التطعيم وفق الاسس المبينة ادناه :

وللحصول على اقصى I_{SC} ، بعد معرفة عمق المفرق فان اهم عامل هو طوّل مسار الانتشار وهذا يتحدد عادة بواسطة ديمومة (life time) حاملات الاقلية لهذه المنطقة ($L_e = \sqrt{D_e \tau_e}$) . في الفقرة (3.4)
سبق ان بينا ثلاث عمليات مختلفة لاعادة الاتحاد تعمل في تحديد هذه الكمية وبصورة عامة تتناقص ديمومة الحاملات لهذه العمليات الثلاث مع ازدياد مستوى التطعيم كما مبين في الشكل (8.7) حيث نرى اعتماد الديمومة على التطعيم والقيمة النسبية للديمومة للعمليات الثلاث بالنسبة لاعادة الاتحاد خلال الشرك فإن العلاقة المثالية التي تربط تغير الديمومة مع نسبة التطعيم تتبع العلاقة (3.22) ولها الصيغة الاتية

$$\tau_{nT} = \tau_{n0}\left(1 + \frac{m_1}{N_A}\right) \qquad (8.25)$$



الشكل 8.7 المقادير النسبية لديمومة حاملات الاقلية واعتمادها على كثافة الشوائب كما وجدت في ثلاث عمليات مختلفة في السليكون .

حيث m_1 تساوي تقريباً اكبر العاملين $\tau_{p0}n_1/\tau_{n0}p_1$. وتحدد قيمتها بواسطة الطاقة او بالمقاطع العرضية للقنص في الشرك المهمين . اما العلاقة التقريبية لعملية اعادة اتحاد أوشي Auger عند مستويات عالية من التطعيم (فقرة 3-4.3) فهي :

$$\tau_{nA} = \frac{1}{DN_A^2} \tag{8.26}$$

بينما عملية اعادة الاتحاد الاشعاعي (فقرة 3.4.2) تكون :

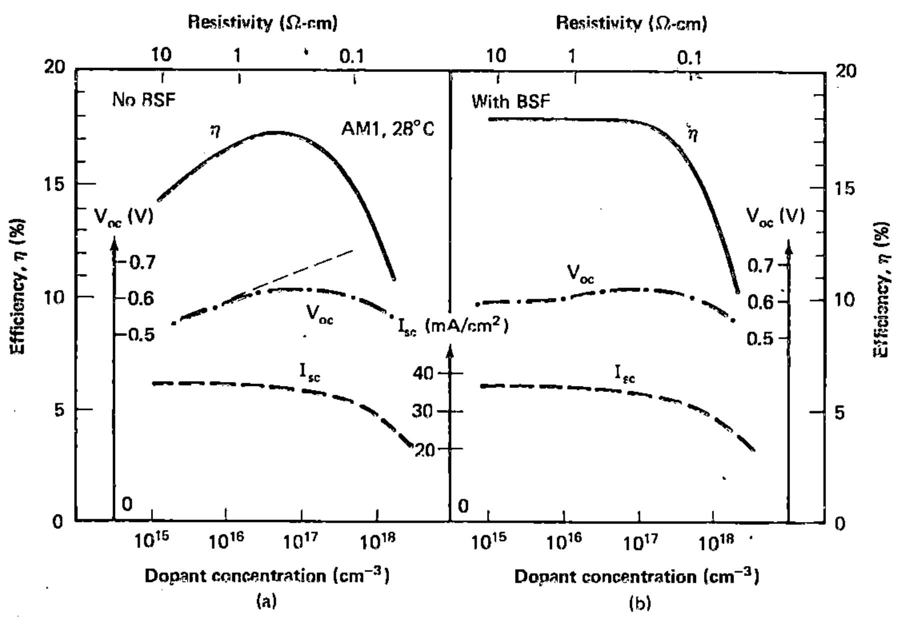
$$\frac{1}{\tau_n} = \frac{1}{\tau_{nT}} + \frac{1}{\tau_{nA}} + \frac{1}{\tau_{nR}} \tag{8.28}$$

وكنتيجة للمناقشات السابقة يتبين ان الزيادة في N_A تؤدي الى تناقص I_{SC}. واما فيما يتعلق بفولتية الدائرة المفتوحة . فان العلاقة البسيطة لكثافة تيار الاشباع في الثنائي هي :

$$I_0 = qA\left(\frac{D_e n_i^2}{L_e N_A} + \frac{D_h n_i^2}{L_h N_D}\right) \qquad (8.29)$$

ان اصغر I_0 يعني اكبر V_{oc} لذا فمن المناسب جعل N_A و N_D اكبر مايمكن للحصول على أعلى V_{oc}. وبالنسبة للارضية من نوع P ـ فإن التطعيم للطبقة السطحية n- اعلى مايمكن وذلك لتقليل المقاومية الصفيحية لذا فان الحد الثاني في المعادلة 8.29 يكون صفيراً وبصورة مقبولة ويناقش هذا الموضوع في الفقرة 8.6 . ومن هذا ينتج ان V_{oc} تتزايد بتزايد N_A

وبما ان V_{oc} و I_{SC} يعتمدان على N_A وبشكل عكسي وهذا يؤدي الى ان هناك مستوى مثالي لتطعيم الأرضية للحصول على اقصى كفاءة لتحويل الطاقة. وهذا يتفق مع نتائج التجربة المبينة في الشكل (a) 8.8 وهذه النتائج مأخوذة من نبائط تجريبية حسنة الاداء على ارضيات لها مستويات مختلفة من التطعيم .



الشكل 8.8 اعتماد المتغيرات الرئيسة على كثافة الشوائب في منطقة نوع P- تم الحصول عليها بخلية تجريبية ذات اداء عال (a) بدون مجال السطح الخلفي (b) مع مجال السطح الخلفي

8-4 مجال السطح الخلفي BACK SURFACE FIELDS

لقد ذكرنا سابقاً ان المنطقة عالية التطعيم قرب القطب الخلفي تزيد من تيار الدائرة القصيرة وفولتية الدائرة المفتوحة . وزيادة تحسن تيار الدائرة القصيرة ناجم عن جودة كفاءة التجميع قرب القطب الخلفي كما مبين في الشكل 8.5 .

اما تحسن فولتية الدائرة المفتوحة فناجم عن قلة تيار الاشباع (الفقرة 4.9) بوجود مجال السطح الخلفي وياخذ الصيغة الآتية :

$$I_{0p} = \frac{qD_e n_i^2}{L_e N_A} \tanh\left(\frac{W_p}{L_e}\right) \qquad (8.30)$$

وعندما يكون سمك منطقة النوع -P اقل بكثير من طول مسار الانتشار ($W_p << L_e$) فإن هذه المعادلة تختصر الى

$$I_{0p} = \frac{qn_i^2 W_p}{\tau_e N_A} \qquad (8.31)$$

وان الزيادة في τ_e مع تناقص N_A كما مبينة في الشكل 8.7 يعني ان V_{oc} لاتعتمد على المقاومية للمقاومات العالية . وهذا يختلف عن حالة غياب المجال السطحي الخلفي . ويمكن الحصول على اعلى الكفاءات عندما تكون كثافة التطعيم قليلة على الاّ تسبب المقاومة المتوالية للأرضية اثراً في ذلك [1] وهذا مبين في الشكل (b) 8.8 الذي يوضح نتائج مناظرة كما هو في الشكل (a) 8.8 عندما يكون مجال السطح الخلفي موجوداً .

---

(1) للمقاوميات العالية يكون تركيزحاملاتالاقلية على الارجح مقاربة لتركيز حاملات الاغلبية وهذا لايعقد عملية حساب المقاومة المتوالية فحسب بل يبطل التحليل الذي اعتمد للتوصل الى المعادلات في هذا الفصل وان علاقة التيار الظلامي في هذه الحالة مشابهة من حيث البساطة للعلاقة (8.31) (المرجع 8.1) وتعطي بـ :

$$I = \frac{qn_i W_p}{(\tau_e + \tau_h)} (e^{qV/2kT} - 1)$$

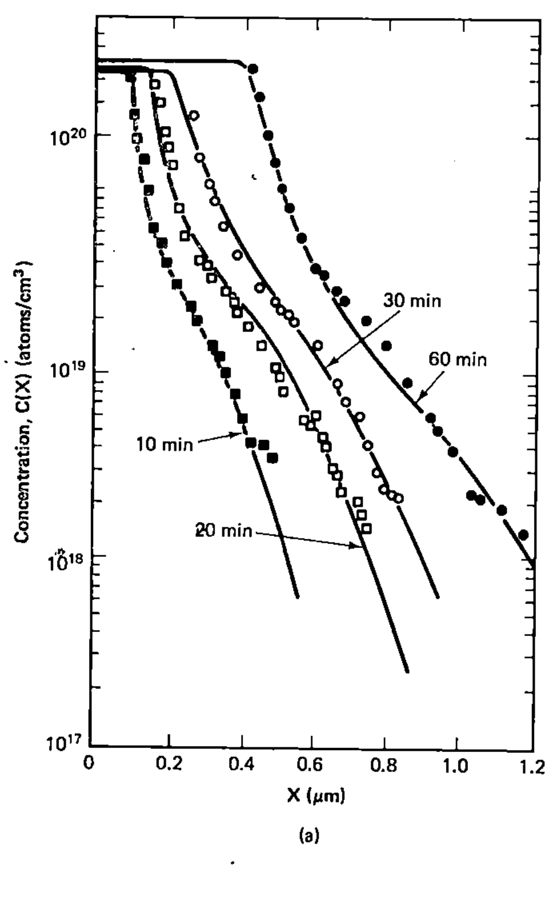
8.5 تحديد الطبقات السطحية TOP. LAYER LIMITATIONS

8.5.1 الطبقات الميتة Dead Layers

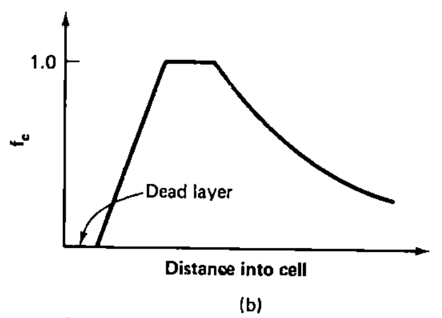
تبين في الفقرة 8.3 ان السرعة العالية الفعالة لاعادة الاتحاد عند السطح العلوي من الخلية تودي الى تصميم مثالي للنبيطة حيث تكون الطبقة المنتشرة العليا من الخلية ارق مايمكن مع الحصول على مقاومية صفيحية مقبولة . في الخلايا المصنوعة للاستعمالات الفضائية في الستينات من هذا القرن كانت الاعماق النموذجية للمفرق تحت السطح بحدود 0.5 مايكرون مع نشر اكبر مايمكن من شوائب الفسفور ضمن هذا العمق لابقاء المقاومية الصفيحية واطئة ، الا انه ادى الى تأثيرات جانبية غير مرغوبة .

من الاعتبارات النظرية البسيطة (المرجع 8.2) انتشار الفسفور داخل السليكون بنمط كاوسي أو شبه كاوسي وذلك بعد اجراء عملية الانتشار بدرجات حرارية عالية من مصدر فسفوري متواصل عند سطح الرقاقة . والشكل (a) 8.9 يبين توزيع الفسفور الفعال كهربائياً كما وجد عملياً بعد الانتشار لازمنة مختلفة عند درجة حرارة ثابتة ، ويظهر بوضوح وجود حد اعلى لكمية الفسفور الفعال كهربائياً . وهذا الحد يساوي قابلية ذوبان الفسفور الصلب في السليكون عند درجة حرارة الانتشار . واما كمية الفسفور الزائد عن هذا المقدار فيتوقع ان تتحول الى رواسب غنية بالفسفور ، وإن ديمومة حاملات الاقلية في المناطق المحتوية لمثل هذه الترسبات تقل بصورة فجائية .

وفي الخلية الشمسية تقع المناطق التي تحتوي على الفسفور الفائض بالقرب من سطح الخلية وهذا يكوّن « طبقة ميتة » قرب السطح والتي تكون عندها احتمالية تجميع الحاملات المتولدة ضوئياً قليلة جداً وذلك لان ديمومة حاملات الاقلية في هذه المنطقة واطئة جداً . واحتمالية التجميع المناظرة لهذه الحالة مبينة في الشكل 8.9 (b) . وعندما تم تشخيص هذه المشكلة بوضوح (المرجع 8.3) اجريت تحويرات هامة في تصميم الخلية لانتاج خلية ذات كفاءة عالية . وهذه الخلية تعرف بالخلية البنفسجية (Violet cell) (في هذه الخلايا يقع المفرق على اعماق اقل من (0.2 μ) ويكون تركيز الفسفور عند السطح دون الحد الأعلى من قابلية ذوبان الصلب مزيلة بذلك الطبقات الميتة . وهذا ايضاً يقلل من المقاومية الصفيحية للطبقة العليا حيث يساعد على تضييق الفسحة بين الاصابع المعدنية للقطب العلوي .



(a)



(b)

الشكل 8.9 (a) شكل انتشار الفسفور النشط كهربائياً داخل السليكون لازمنة مختلفة من الانتشار عند درجة انتشار ثابتة،(b) احتالية كدالة للعمق داخل الخلية لخلية من نوع ذات طبقة ـانتشارية وبطبقة ميتة

[After J. C. Tsai, *Proceedings of the IEEE* 57 (1969), p. 1499

8.5.2 تأثيرات التطعيم العالي : High-Doping Effects

يتوقع ان تكون ديمومة الحاملات الاقلية في المنطقة السطحية العليا ذات التركيز العالي من الشوائب واطئة لأسباب عدة . كما مبين في الشكل 8.7 فان عملية اعادة اتحاد أو شي تؤدي الى تخفيض القيم القصوى لديمومة الحاملات في هذه المنطقة . اضافة الى ذلك فإن احتمالية تكوين الرواسب والتشوه في التركيب السطحي للبلورة ، بواسطة عملية الانتشار بدرجات الحرارة العالية ، تزيد من عدد مراكز اعادة الاتحاد بواسطة مستويات الشرك المتكونة . وهذه تقلل الديمومة الى اقل من حدود عملية اوشي والتأثير الاخر المهم للمناطق العالية التطعيم هو تضييق الفجوة المحظورة في شبه الموصل (المرجع 8.4) . ولهذا تأثير كبير على القيمة الفعالة للتركيز الذاتي n_i .

8.5.3 الأسهام في كثافة تيار الاشباع Contribution to Saturation Current Density

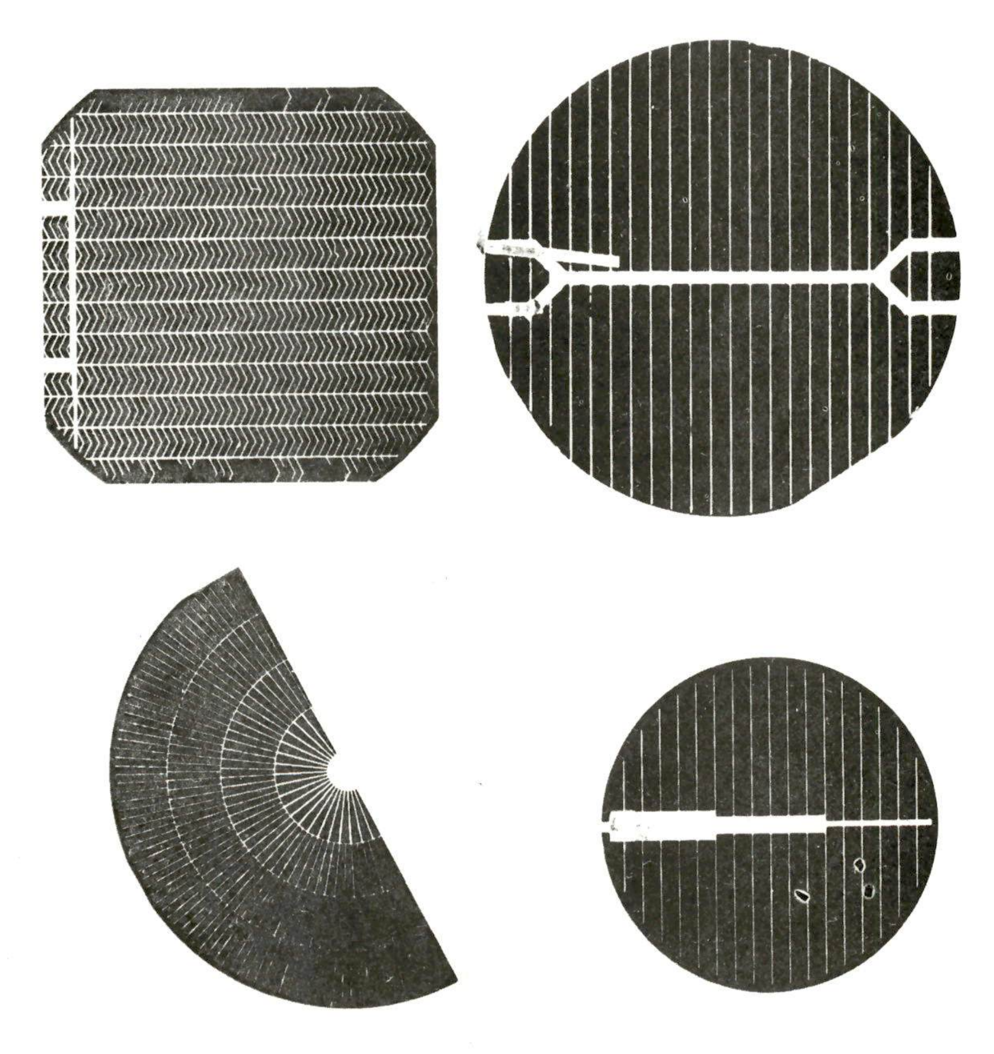
في الفقرة 8.3 و 8.4 تمت مناقشة مكونات تيار الاشباع I_0 للخلية الشمسية والناتجة عن خواص متن من المادة والطبقة السطحية ذات التركيز العالي من الشوائب ولهذا اسهام مهم في هذا العنصر

وهناك بعض الملاحظات العامة حول المواصفات المرغوبة للطبقة السطحية التي يمكن ان تأخذ بنظر الاعتبار لتقليل اسهام الطبقة السطحية الى ادنى حد . وكمثال على ذلك ، فان عملية اعادة الاتحاد في هذه الطبقة والسطح المرتبط بها يجب ان تبقى اقل مايمكن . وفي جميع الاحوال وبسبب التأثيرات المتعددة التي يجب ان تأخذ في الحسبان في المنطقة العالية التطعيم ، يكون من الصعب جداً تحديد الكيفية التي يمكن من خلالها تحقيق ذلك نظرياً . اما من الناحية التجريبية ، فان اقل مساهمة في كثافة تيار الاشباع من هذه الطبقة في الخلايا السليكونية ذات الطبقة الانتشارية تقع بين $1-3\times10^{-12}$ امبير/ سم^2 اما الطبقات السطحية الناتجة عن غرس الايونات (Ion implantion) فأنها تعطي قيم اقل من ذلك بقليل (مرجع 8.5) .

وبصرف النظر عن كيفية اختيار خواص مادة الرقاقة لتقلل اسهام الأرضية الى ادني حد ، فان اسهام الطبقة السطحية العليا ستحدد اقصى فولتية الدائرة المفتوحة التي يمكن للخلية السليكونية من النوع الذي تم وصفها ان تحقق وتكون قيمة هذه الفولتية 600 و 630 مليّ فولت عند الاختبار في الظروف القياسية . ويمكن ملاحظة تأثير هذا الحد في الشكل (a) 8.8 و (b) 8.8 . وهذا لايسمح بالانتفاع الكامل من الجهد الفوتوفولطائي لأرضية المادة وسنرى في الفصل التاسع وصفاً لتصاميم اخرى تتجاوز هذه التحديدات .

8.6 تصميم الوصل أو القطب العلوي TOP-CONTACT DESIGN

احد العناصر المهمة في تصميم الخلية هو شبكة التوصيل المعدنية العليا واهمية هذا العنصر اخذت تتزايد اكثر فأكثر مع ازدياد حجم الخلايا المفردة . وان الشكل 8.10 يبين بعض الاشكال المختلفة في تصميم القطب العلوي للخلايا المستعملة تجارياً .



الشكل **8.10** مجموعة منتجة من الخلايا الشمسية السليكونيه بين محاولات مختلفة لتصميم الاقطاب الامامية للخلية .

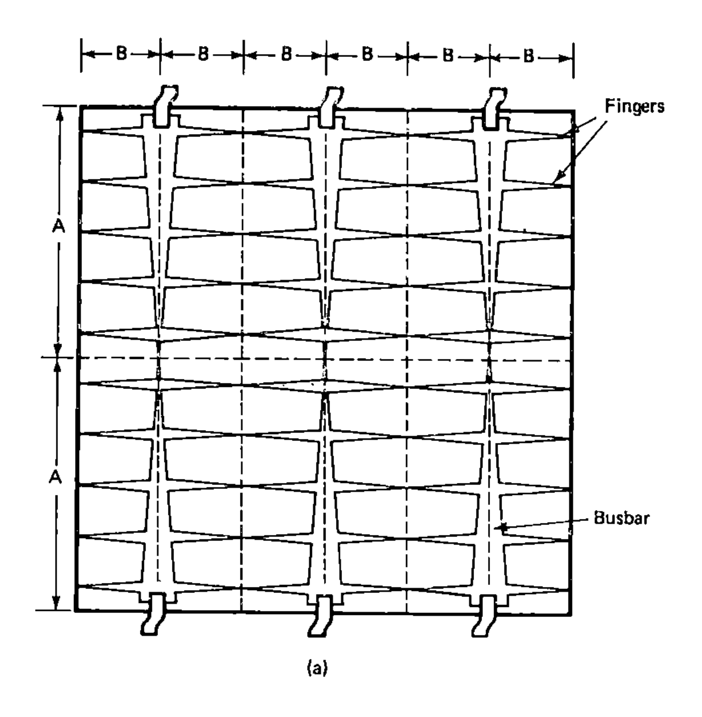
وهناك عدة اليات لهدر القدرة ترتبط مع القطب العلوي كالفقد بسبب التيار العرضي في طبقة الانتشار العليا من الخلية والتي وصفت قبل قليل . اضافة الى ذلك فهناك الخسائر بسبب المقاومة المتوالية للخطوط المعدنية ومقاومة التماس بين هذه الخطوط وشبه الموصل . واخيراً الفقد بسبب تظليل الخلية الناتج من هذا الخطوط .

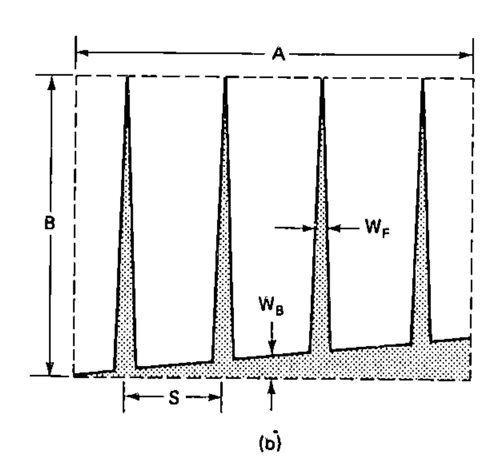
وفي هذه الفقرة ستأخذ بنظر الاعتبار تصميم الاقطاب للخلايا المربعة والمستطيلة الشكل . ومن الممكن استخدام تقنيات خلايا مشابهة اكثر شيوعاً اما بالنسبة لتصاميم الاقطاب الشائعة فيمكن ملاحظة عنصرين فيها كما في الشكل (a) 8.11 : الموصلات الرئيسة (busbars) وهي مناطق معدنية سميكة نسبياً تربط مباشرة بالاسلاك الخارجية للخلية ، والموصلات الفرعية (الاصابع) تكون ادق من الموصلات الرئيسة وتقوم بجمع التيار وتوصيله الى الموصل الرئيس وكما مبين في الشكل 8.10 وقد يكون هناك اكثر من مستوى واحد من الاصابع المتفرعة في بعض تصاميم الخلية . فتكون الاصابع الفرعية والموصلات الرئيسة اما بعرض ثابت أو يتغير عرضه مع الطول لتكون مستدقه الطرف وقد تكون متدرجة . يمكن تقسيم اقطاب ذات اجزاء متناظرة كما في الشكل 8.11(a) الى وحدات صغيرة كما في الشكل (b) 8.11 . وان اقصى قدرة خارجة لهذه الوحدة تساوي $ABJ_{mp}V_{mp}$ ، اذ AB هي مساحة الوحدة و J_{mp} و V_{mp} هما كثافة التيار والفولتية عند نقطة القدرة القصوى (maximum power point) .
ويمكن حساب الخسارة بسبب مقاومة الاصابع والموصلات الرئيسة باجراء التكامل الذي استخدم لحساب فقد القدرة للطبقة السطحية من الخلية في الفقرة 8.2.3 . وقياساً بالنسبة الى القدرة* القصوى لوحدة الخلية فان النتيجة تكون كما في المرجع (8.6) .

$$p_{rf} = \frac{1}{m} B^2 \rho_{smf} \frac{J_{mp}}{V_{mp}} \frac{S}{W_F} \tag{8.32}$$

$$p_{rb} = \frac{1}{m} A^2 B \rho_{smb} \frac{J_{mp}}{V_{mp}} \frac{1}{W_B} \tag{8.33}$$

حيث ρ_{smf} و ρ_{smb} هي مقاوميات الصفيحية للتوصيل المعدني لكل من الاصابع والموصلات الرئيسية وتكونان متماثلتين في بعض الحالات بينما في حالات اخرى كحالة الخلايا المغطسة في اللحام (solder-dipped) ، تتكون طبقة سميكة من المعدن فوق الموصلات الرئيسة وتكون ρ_{smb} اصغر وان قيمة m تساوي 4 عندما يستدق عرض الاصبع خطياً وتساوي 3 عندما يكون عرض الاصبع





الشكل 8.11 (a) رسم تخطيطي لتصميم القطب الامامي تبين فيه الموصلات الرئيسة والاصابع المعدنية وكذلك التناظر في التصميم حيث يمكن تقسيم القطب الى 12 وحدة توصيلية متماثلة (b) الابعاد النموذجية لوحدة نموذجية .

منتظماً وان W_F و W_B يمثلان معدل عرض الاصابع والموصلات الرئيسة الواقعة ضمن الوحدة و S هي المسافة بين الاصبعين المتجاورتين كما مبين في الشكل (8.11 b)

ان الجزء المفقود من القدرة بسبب التظليل الناتج عن الاصابع والموصلات الرئيسة هو

$$p_{sf} = \frac{W_F}{S} \qquad (8.34)$$

$$p_{sb} = \frac{W_B}{B} \qquad (8.35)$$

وبأهمال التيار الساري مباشرة من شبه الموصل الى الموصل الرئيس ، فان الفقدان بسبب مقاومة التلامس ينتج عن الاصابع فقط . اما الجزء المفقود من القدرة نتيجة هذا التأثير بصورة تقريبية فيكون كالاتي :

$$p_{cf} = \rho_c \frac{J_{\mathrm{mp}}}{V_{\mathrm{mp}}} \frac{S}{W_F} \qquad (8.36)$$

حيث ρ_c المقاومة النوعية للتماس والفقد بسبب مقاومة التماس ليس له اهمية كبيرة عند عمل الخلية السليكونية تحت اضاءة شمس واحد . اما القدرة المفقودة الاخرى فإنها تحدث بسبب السريان العرضي للتيار في الطبقة السطحية من الخلية وبالصيغة النسبية وهذه تكون حسب المعادلة (8.33) .

$$p_{tl} = \frac{\rho_s}{12} \frac{J_{\mathrm{mp}}}{V_{\mathrm{mp}}} S^2 \qquad (8.37)$$

حيث ρ_s هي المقاومة الصفحية لهذه الطبقة

من الممكن ايجاد الابعاد المثالية للموصل الرئيس وذلك بجمع المعادلتين 8.33 و 8.35 ومن ثم تفاضل النتيجة بالنسبة الى W_B للحصول على القيمة المثلى (المرجع 8.6) . ومن الممكن الحصول على القيمة المثلى عندما يكون الفقد بسبب المقاومية في الموصل الرئيس (busbar) مساوياً للفقد بسبب التظليل وهذا يحدث عندما يكون

$$W_B = AB\sqrt{\frac{\rho_{smb}}{m}\frac{J_{mp}}{V_{mp}}} \qquad (8.38)$$

وان القيمة الدنيا للفقد الجزئي للقدرة هي :

$$(p_{rb} + p_{sb})_{min} = 2A\sqrt{\frac{\rho_{smb}}{m}\frac{J_{mp}}{V_{mp}}} \qquad (8.39)$$

وهذه المعادلة تدل على ان مقدار القدرة المفقودة تكون أقل بـ 13% عند استخدام الموصل الرئيس المستدق $(m = 4)$ بدلاً من موصل بعرض ثابت $(m = 3)$

ويكون تصميم ادق المستويات من اصابع التعدين[2]، اكثر تعقيداً وذلك لان هذا المستوى يحدد ايضاً الفقد العرضي في المنطقة السطحية في الخلية وكذلك فقد مقاومة التماس في الخلية . ومن العمليات الحسابية يتبين ان افضل تركيب للقطب يكون بجعل الفسحة بين الاصابع صغيرة جداً اذ يصبح الفقد العرضي لا اهمية له وتتحدد الحالة المثلى عندما يكون

$$S \to 0 \qquad (8.40)$$

عندئذ يكون :

$$\frac{W_F}{S} = B\sqrt{\frac{\rho_{smf} + \rho_c m/B^2}{m}\frac{J_{mp}}{V_{mp}}} \qquad (8.41)$$

$$(p_{rf} + \rho_{cf} + \rho_{sf} + \rho_{tl})_{min} = 2B\sqrt{\frac{\rho_{smf} + \rho_c m/B^2}{m}\frac{J_{mp}}{V_{mp}}} \qquad (8.42)$$

---

(2) اذا كان هناك اكثر من مستوى من الاصابع فعندئذ تؤخذ المستويات العليا كموصلات رئيسة بالنسبة للمستويات الادنى وفي هذه الحالة يكون هناك وحدة خلية مختلفة لكل مرتبة من التعدين .

اما من الناحية العملية فلايمكن الحصول على هذا الاداء المثالي. اذ ان كل من التقنيات المستخدمة لعمل التوصيلات العليا المذكورة اعلاه لها حدودها الخاصة بها للقيمة الدنيا لـ W_F ومن ثم S مع ضمان مستوى مقبول من الانتاجية ضمن ظروف التصنيع.

وفي هذه الحالة يمكن الحصول على احسن تصميم للاصابع وذلك بعملية تكرار بسيطة اما بالنسبة لعرض الاصبع W_F فإن دقة الاصبع تتوقف على الامكانات التقنية واذا ماثبتت تلك القيمة المثالية لـ S والمرتبطة بها تتحدد عن طريق التقريبات المتتالية وقد تم حساب القدرة الجزئية المفقودة $p_{rf}, p_{cf},$ و p_{sf} عند قيمة تجريبية محددة S عندئذ تكون $p_{tl}S$ هي الاقرب الى الحالة المثالية بدلا من s^3 ويمكن حسابها في المعادلة [3].

$$S'' = \frac{S'(3p_{sf} - p_{rf} - p_{cf})}{2(p_{sf} + p_{tl})} \qquad (8.43)$$

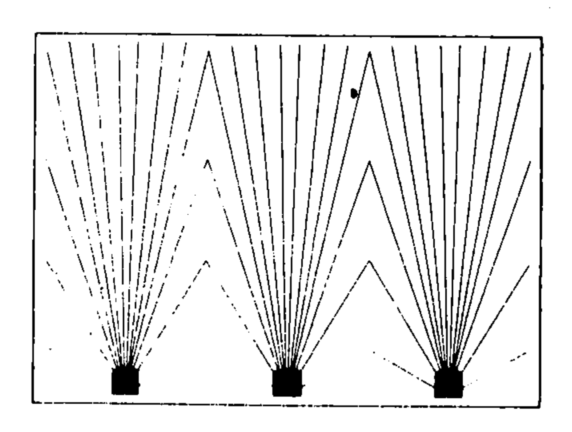
وبهذه العملية التقريبية تقترب S' بسرعة من قيمة ثابتة تمثل بالقيمة المثالية ومن الممكن ايجاد القيمة التجريبية الابتدائية للقيمة المثالية وذلك بملاحظة ان قيمة S المحسوبة من المعادلة (8.41) هي اعلى من القيمة المثالية وان القيمة المساوية لنصف هذه القيمة ستؤدي الى سلسلة من التكرار المستقر.

ان العملية التقريبية السابقة ستساعد على اختيار الابعاد المثالية للموصل الرئيس والاصابع عندما يتم تعيين الشكل الاجمالي للقطب. وهذا الشكل الاجمالي يمكن ان يتحدد ضمن اعتبارات اخرى غير اعتبارات التوصيل المثالي مثل سهولة ربط الخلايا بطريقة ذاتية. وكقاعدة عامة كلما صغرت وحدة الخلية كلما كان فقد التوصيل العلوي اقل. وان الاضافة في التوصيلات لا تزيد وثوقية التوصيل في اللوح فحسب، بل تقلل ايضاً من الخسائر الناتجة من التوصيلات العليا وذلك لتقليل مساحة الوحدة. واذا كانت المقاومية الصفيحية للموصلات الرئيسية أقل من المقاومية الصفيحية للاصابع فمن الافضل استعمال موصلات رئيسة طويلة واصابع قصيرة كالشكل الموجود في مقدمة هذا الكتاب شريطة ان تكون تأثيرات مقاومة التوصيل صغيرة. في الحالة المبينة سابقاً فالجزء الحامل للتيار من الموصلات

---

(3) يمكن اشتقاق هذه المعادلة بتفاضل معادلة فقد القدرة $(p_{rf} + p_{cf} + p_{sf} + p_{tl})$ بالنسبة لـ S ويجب ان يكون الاشتقاق مساوياً للصفر للقيمة المثلى لـ S ومن ثم يمكن ايجاد القيمة المثلى لـ S باستخدام طريقة نيوتن للتكرار (مرجع 8.7) لايجاد جذور المعادلات اللاخطية.

الرئيسة هو على شكل شرائط معدنية مستقيمة وتتمد على طول الخلية ، وحتى بالنسبة للخلايا المستطيلة ربما يكون الافضل اختيار شكل التوصيلات غير المستقيمة الخطوط والتي تم وصفها سابقاً . وكمثال فمن الممكن اختيار مخطط التوصيل الاشعاعي (radial contact scheme) كامبين في الشكل (12-8) والذي يكون بخسائر توصيل واطئة جداً .



الشكل 12-8 تخطيط لتعدين اشعاعي الشكل لخلية شمسية مستطيلة .

ويجب ان نلاحظ بان المعادلات الموجودة في هذه الفقرة بينت على تقريبات معينة (مرجع 8.8) تتعلق بحجم فقد القدرة العيارية وقيمة الفولتية الرابطة عبر مقاومات الخلية وكذلك اتجاه جريان التيار خاصة عند نقاط توصيل الموصلات الرئيسة بالاصابع . وقد لا تكون مستدقة الاطراف شكلا مثالياً للموصلات الرئيسة وللاصابع في اشكال مختلفة من الخلايا (مرجع 8.9) وقد يكون من الافضل النظر في هذه التأثيرات الثانوية في بعض الحالات مثل استخدام الخلايا الخاصة بالاشعة المركزة اذ يكون تصميم القطب العلوي عاملاً مهماً

مسألة :

صمم القطب العلوي لخلية شمسية سليكونية بمساحة (10 × 10 سم) والقدرة القصوى الخارجة تكون عند فولتية 450 ملي فولت وكثافة التيار بحدود 30 ملي امبير/ سم٢ ، علماً ان المقاومية الصفيحية للطبقة العليا (الطبقة المنتشرة) تساوي $40\ \Omega/\square$

ويتم الربط الخارجي للخلية بتوصلتين ويتم التعدين بواسطة الطلاء المعدني (plating) ثم القطس في اللحام (solder dipping) ويتم تحديد عرض الاصابع بـ 150 مايكرومتر والمقاومية الصفيحية لطبقة التعدين تتحدد وبصورة رئيسة بمقاومية طبقة اللحام العلوي والتي تساوي $15\ \mu\Omega\text{-}cm.$. وتترسب عادة طبقة اللحام على الاصابع بمعدل سمك 42 مايكرون وفوق الموصلات الرئيسة بسمك 80 مايكرون . اما المقاومة النوعية للتماس بين الاصابع وشبه الموصل فتساوي 370 مايكروأوم – سم٢ .

الحل :

باستخدام المصطلحات الواردة في هذه الفقرة :

$$J_{\text{mp}} = 0.03\ \text{A/cm}^2 \qquad V_{\text{mp}} = 0.45\ \text{V}$$
$$\rho_s = 40\ \Omega/\square \qquad \rho_c = 370\ \mu\Omega\text{-cm}^2$$

والمقاومية الصفيحية لطبقات اللحام = مقاومية متن المادة / سمك الطبقة

ولذا

$$\rho_{smf} = 0.00357\ \Omega/\square \qquad \rho_{smb} = 0.00188\ \Omega/\square$$

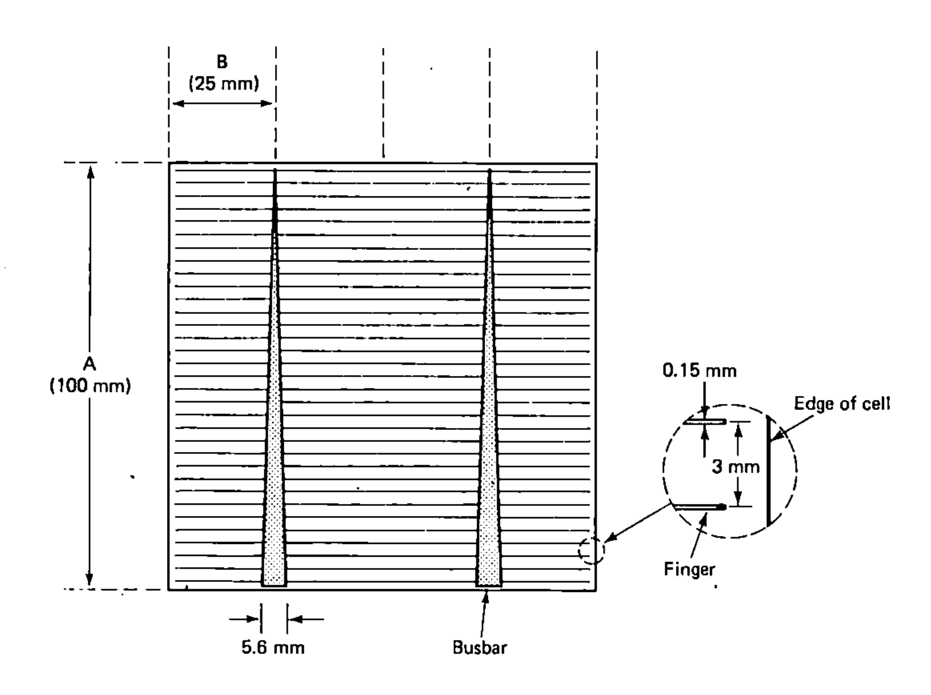
وبما ان ρ_{smf}, $\rho_{smb} < \rho_{smf}$ لذايفضل تصميم الاقطاب بموصلات رئيسة طويلة واصابع قصيرة . والشكل 13-8 يبين نموذجاً لهذا التصميم . وتقسم هذه الى اربع وحدات كل منها تكون بطول (A) 10 سم وعرض (B) 2.5 سم .

فمن الممكن حساب الابعاد المثالية للموصل الرئيس من المعادلة 8.38 باستخدام الشكل المستدق (m = 4) فإن العرض المثالي لوحدة الخلية يكون :

$$W_B = 10 \times 2.5 \left(\frac{0.00188 \times 0.03}{4 \times 0.45}\right) \text{cm} = 0.14\ \text{cm}$$

وبما ان الموصل الرئيس يقع بين وحدتي الخلية لذا فإن عرض الموصل يساوي ضعف هذا المقدار لذا يتزايد عرض الموصل الرئيس طولياً من ارفع رأس محتمل الى اقصى عرض وهو 0.56 سم وتكون القدرة الجزئية المفقودة تبعاً للمعادلة

$$p_{rb} + p_{sb} = 0.112 \quad : (8.39)$$



الشكل 13-8 تخطيط التصميم القطب العلوي تم اختباره كمثال للتصميم . والفقد الكلي بواسطة مقاومة المعدن والطبقة المنتشرة للخلية بحدود 8.6% .

وقد تم تحديد عرض الاصبع 150 مايكرون (W_F = 0.015 cm) . بفرض ان هذه القيمة هي الحد المسموح تقنياً ولا يمكن عمل اصبع ادق من ذلك ، ولهذا التقيّد فإن استخدام اصبع بعرض ثابت (m = 3) لن يكون بعيداً عن القيمة المثالية ، وتحسب الفسحة المثالية بين الاصابع (S) عادة باستخدام عملية التكرار . اما القيمة التجريبية الابتدائية (S) فإنها تحسب بقسمة قيمة S الناتجة من المعادلة 8.41 على 2 وهذا يعطى :

$$S = 0.3286 \text{ cm} \quad p_{rf} = 0.0109 \quad p_{cf} = 0.0005$$
$$p_{sf} = 0.0456 \quad p_{tl} = 0.0240$$

وبتعويض هذه القيم في المعادلة (8.43) ينتج الحل التجريبي الاقرب

$$S = 0.2962 \text{ cm} \qquad p_{rf} = 0.0098 \qquad p_{cf} = 0.0005$$
$$p_{sf} = 0.0506 \qquad p_{tl} = 0.0195$$

وباستمرار عملية التكرار مرة ثانية نحصل على

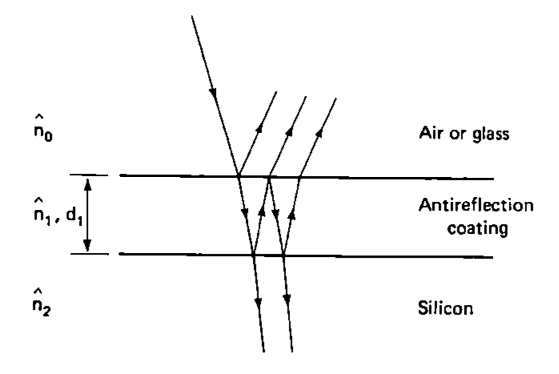
$$S = 0.2991 \text{ cm} \qquad p_{rf} = 0.0099 \qquad p_{cf} = 0.0005$$
$$p_{sf} = 0.0502 \qquad p_{tl} = 0.0199$$

ان الاستمرار في عملية التكرار لايغير قيمة S مما يؤدي الى التوصل الى القيمة المثلى وان مجموع الخسارة الجزئية للقدرة بسبب الاصابع المعدنية ومقاومة الطبقة السطحية تساوي 8% . وبذا فإن حاصل جمع الفقد في الخلية بهذا التصميم يكسو من 19.2% من النتاج الذاتي للخلية . ويظهر التصميم الكامل للقطب في الشكل 8.13 .

8.7 التصميم البصري OPTICAL DESIGN

8.7.1 الطلاء غير العاكس Antireflection coating

الشكل 8.14 يوضح مفاهيم الطلاء ربع الموجي غير العاكس . اما الضوء المنعكس من السطح البين الثاني فإنه يرجع الى السطح البين الاول ويفارق في الطور مع الاشعة المنعكسة من السطح البين الاول قدره 180° درجة مما يؤدي الى الغاء الاشعة المنعكسة الى حد ما .



الشكل 8-14 تأثيرات التداخل بواسطة طلاء غير عاكس ربع موجي .

وعند سقوط حزمة ضوئية عمودية فإن القيمة النسبية للطاقة المنعكسة من المادة المطلية المغطاة بطبقة سمكها d_1 وتسمح بنفاذ الضوء هي (مرجع 8.10) :

$$R = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos 2\theta}{1 + r_1^2 r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos 2\theta} \qquad (8.44)$$

حيث ان r_1 و r_2 يعطى بـ :

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \qquad r_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \qquad (8.45)$$

و n_i تمثل معاملات الانكسار (refractive index) للطبقات المختلفة اما الزاوية θ فهي :

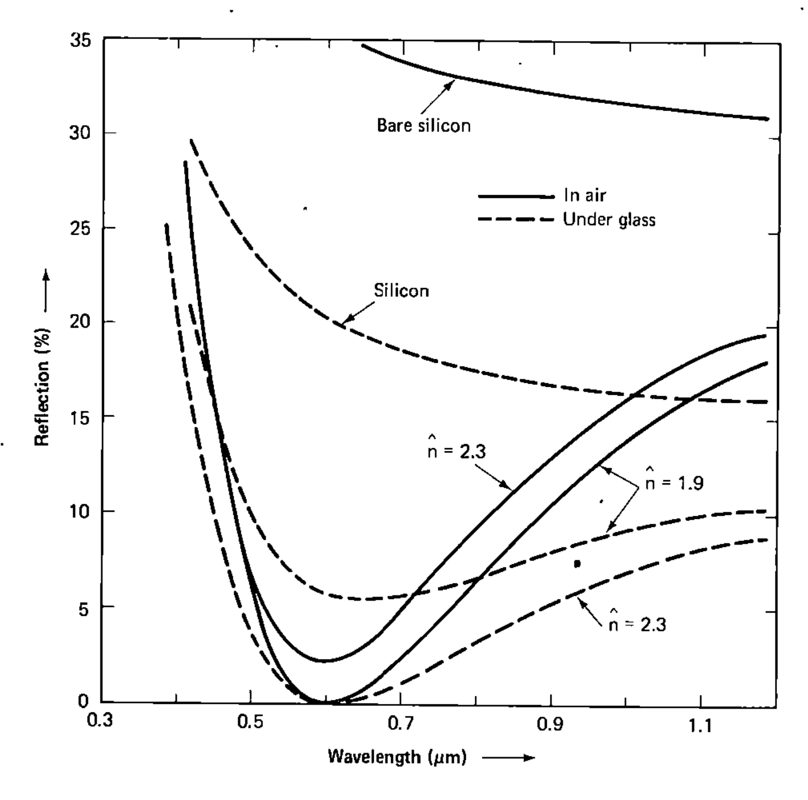
$$\theta = \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \qquad (8.46)$$

وعندما $n_1 d_1 = \lambda_0 /4,$ تكون للانعكاسية ادنى قيمة :

$$R_{\min} = \left(\frac{n_1^2 - n_0 n_2}{n_1^2 + n_0 n_2}\right)^2 \qquad (8.47)$$

وهذه تساوي صفراً اذا كان معامل انكسار الطبقة المطلية غير العاكسة يساوي المعدل الهندسي لمعامل الانكسار للوسطين على جانبي هذه الطبقة $(n_1^2 = n_0 n_2)$ وللخلايا السليكون في الهواء ($n_{si} \approx 3.8$) فإن معامل الانكسار المثالي هو الجذر التربيعي لمعامل الانكسار في السليكون (أي $n_{\rm opt} \approx 1.9$) ، ويبين الشكل 8.15 النسبة المئوية لانعكاس الضوء الساقط

على سطح السليكون كدالة للطول الموجي لطبقة الطلاء غير العاكس ذي معامل انكسار مثالي ليعطي ادنى انعكاس عند 600 نانومتر . ومعدل الضوء المنعكس الذي يمكن الافادة منه يساوي 1090 تقريباً مقابل اكثر من 30% في حالة السليكون غير المطلي .



الشكل **8-15** النسبة المئوية المنعكسة من الضوء الساقط عمودياً على سطح سليكون مكشوف وسطح آخر مطلي بطلاء غير عاكس بمعاملات الانكسار و **9.3** و **2.3** كدالة لطول الموجة . وتم اختيار سمك الطلاء للحصول على ادنى انعكاس عند 600 نانومتر . والخطوط المتقطعة تبين تأثير التغليف بطبقة زجاجية أو بمادة لها معامل انكسار مشابه لها .

وتغطى الخلايا عادة بطبقة زجاجية أو بمادة ذات معامل مشابه للزجاج (n_0 ~ 1.5)وهذا يزيد من القيمة المثالية لمعامل الانكسار للطلاء غير العاكس الى حوالي 2.3 . ويظهر في الشكل 8.15 الانعكاس من خلية لها طبقة غير عاكسة بمعامل انكسار 2.3 قبل وبعد التغليف ويبين الجدول 8.1 قائمة بمعاملات الانكسار للمواد المستخدمة في الخلايا الشمسية التجارية والمادة المختارة للطلاء غير العاكس إضافة الى امتلاكها المعامل الصحيح للانكسار يجب ان تكون شفافة ويترسب عادة كطبقة غير بلورية أو عشوائية (amorphous) لتلافي المشاكل الناجمة من الضوء المشتت عند حدود الحبيبات البلورية (grain boundaries) . وان الطبقات المتكونة بعملية التبخير في الفراغ (vaccum evapuration) تقوم عموماً بامتصاص الاطوال الموجية فوق البنفسجية (u.v) أما الطبقات المعدنية المترسبة

بواسطة تقنيات الاكسدة (oxidizing) أو الانودة (anodizing) والطبقات المترسبة بطريقة كيميائية فغالباً تأخذ تركيباً زجاجياً (عشوائي بترتيب ذري ذي مدى قصير) مما يقلل من امتصاص الامواج فوق البنفسجية (مرجع 8.11).

جدول **8-1** معاملات الانكسار للمواد التي تستخدم بطبقة واحدة أو عدة طبقات كطلاء غير عاكس.

Material	*Refractive index*
MgF_2	1.3-1.4
SiO_2	1.4-1.5
Al_2O_3	1.8-1.9
SiO	1.8-1.9
Si_3N_4	~1.9
TiO_2	~2.3
Ta_2O_5	2.1-2.3
ZnS	2.3-2.4

ويمكن تحسين كفاءة الخلية باستعمال طلاءِ غير عاكس متعدد الطبقات وتصميم مثل هذه الطبقات يكون معقداً، ألا ان هذه الطبقات تختزل الانعكاس الى حزم أعرض من الاطوال الموجية (مرجع 8.11) وهناك مصنع واحد على الأقل يستخدم طلاء بطبقتين في الخلايا عالية الكفاءة لتقليل انعكاس ضوء الشمس المستخدم الى حوالي 4%.

8.7.2 السطح الخشن Textured Surface

كما ذكرنا سابقاً ان طريقة تخشين السطح تؤدي الى تقليل الانعكاس وتتضمن هذه الطريقة ازالة طبقة من سطح السليكون بواسطة التآكل باستخدام محلول كيمياوي حيث يقوم المحلول بالتفاعل مع التركيب البلوري في اتجاه بلوري بسرعة اكثر من اتجاه آخر وهذا يسبب ظهور تراكيب سطحية معينة وبذلك تتكون المواشير الصغيرة المبينة في الشكل 7.6 نتيجة تقاطع المستويات البلورية. وبدلالة معامل ملر للاتجاه البلوري (فقرة 2.2) يكون سطح السليكون للخلايا الخشنة موازياً للمستوى (100) وتتكون المواشير الصغيرة من تقاطع المستويات (111).

إن المحلول الشائع الاستخدام لتخشين السطح هو محلول هيدروكسيد الصوديوم القلوي ويعتبر مزيلا انتقائياً.

وتتحدد زوايا المواشير بواسطة اتجاه المستويات البلورية بحيث توفر على الاقل فرصتين للضوء الساقط على السطح ليتفاعل مع الخلية . واذا كان 33% من الضوء الساقط ينعكس عند كل نقطة سقوط كما هو الحال في حالة السليكون غير المخشن . فان حوالي (0.33 × 0.33) اي 11% ينعكس في مرحلتي الانعكاس . واذا طلي هذا السطح بطلاء غير عاكس فإن انعكاس ضوء الشمس يصبح اقل من 3% .

اما عند تغليف الخلية بمادة ذات معامل انكسار مقارب للزجاج وبدون استخدام طلاء غير عاكس فإن الضوء المنعكس ثانية نحو السليكون يكون عادة بزاوية تضمن امتصاصه قريباً من السطح ، وهذا يزيد من احتمالية التقاطه من قبل الخلية وخاصة الموجات الطويلة الضعيفة الامتصاص .

وهناك بعض المشاكل ترتبط باستخدام السطوح المخشنة منها لزوم العناية عند استخدامها (مرجع 8.12) وكما ان هذه السطوح تكون فعالة جداً في اعادة الضوء المنعكس الى الخلية لجميع الاطوال الموجية ومنها الاشعة تحت الحمراء التي تزيد من حرارة الخلية لكنها لاتسهم في توليد ازواج الكترون فجوة . واخيراً فإن القطب المعدني العلوي يجب ان تعطي جوانب الاهرام السطحية اي يكون بسمك 10μ تقريباً وهذا يعني ان كمية المعدن المستخدمة يجب ان تكون مرتين أو ثلاث مرات بقدر مايستخدم منها على السطوح المستوية اذا اريد الحفاظ على الفقد المقاومي نفسه واخيراً يجب ان يغطي القطب المعدني جوانب الاهرام السطحية حيث يكون سمك المعدن بحدود 15 مايكرون تقريباً .

8.8 الاستجابة الطيفية SPECTRAL RESPONSE

لقد مر ذكر الاستجابة الطيفية للخلية في الفقرة 5.5 . وهي تيار الدائرة القصيرة الناتج لوحدة القدرة الساقطة من ضوء احادي اللون كدالة للطول الموجي . ويمكن الحصول من قياس الاستجابة الطيفية على المعلومات التي تحدد العناصر التصميمية للخلية الشمسية .

ويسبب الضوء احادي اللون تكوين ازواج الكترون ــ فجوة في شبه الموصل موزعاً موقعياً بدلالة x وفق العلاقة التالية :

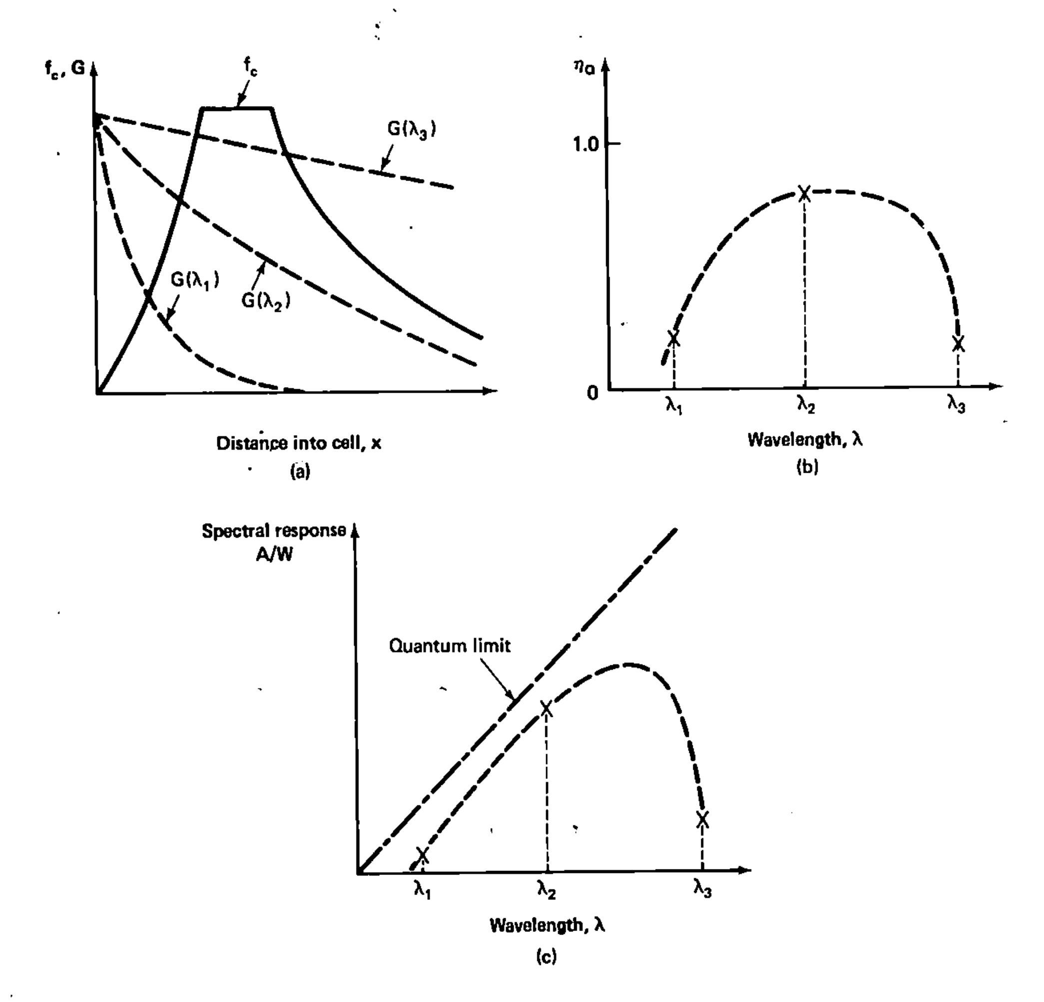
$$G = (1 - R)\,\alpha N e^{-\alpha x} \qquad (8.48)$$

حيث ان N هي فيض الفوتونات الساقطة و R هو الجزء المنعكس و α هو معامل الامتصاص . وبالنسبة للأطوال الموجية القصيرة (فوق البنفسجية) فإن α تكون كبيرة حيث يمتص الضوء بسرعة عند دخوله شبه الموصل كما مبين في الشكل (a) 8.16 . ولا تكون الخلايا الشمسية الاعتيادية فعالة جداً في التقاط الحاملات المتولدة قرب السطح . واذا عرفنا كفاءة التجميع الكمي η_Q (quantum collection efficiency) بأنه عدد الالكترونات الجارية في الدائرة القصيرة الخارجية لكل فوتون ساقط من الضوء احادي اللون . وان η_Q تكون واطئة جداً . وفي حالة الاشعة فوق البنفسجية كما في الشكل (a) 8.16 فعند الاطوال الموجية المتوسطة تكون قيمة α صغيرة وان نسبة كبيرة من الحاملات تتكون من المناطق التي تكون عندها احتمالية التجميع عالية فتكون η_Q عالية . اما عند الاطوال الموجية الطويلة فيكون الامتصاص ضعيفاً وتكون نسبة الحاملات المتولدة في المنطقة الفعالة من الخلية واطئة ولذا تنخفض η_Q وتهبط الى الصفر حالما تصبح طاقة الفوتونات غير كافية لتكوين ازواج الكترون ــ فجوة .

وهناك طريقة اخرى لتوضيح الاستجابة الطيفية غير طريق منحنى الانتاج الكمي (quntum yield) المبينة في الشكل (b) 8.16 هي رسم الحساسية بوحدات امبير / واط كدالة للطول الموجي كما مبين في الشكل (c) 8.16 كما يظهر من الشكل الحد الكمي للاستجابة . اما عند الاطوال الموجية القصيرة فلا تفيد الخلية من الطاقة الكلية للفوتون لذلك تكون حساسيتها واطئة حتى اذا عملت الخلية بشكل مثالي .

اما بالنسبة للخلايا التقليدية (الخلايا المستخدمة في الفضاء) فتكون الاستجابة للاطوال الموجية القصيرة ضعيفة وتحدد بعمق المفرق المستخدم اضافة الى الطلاء غير العاكس المستخدم . اما الاستجابة للاطوال الموجية الطويلة فتحدد بواسطة طول مسار الانتشار لمادة الخلية . وفي بداية السبعينات من هذا القرن ظهرت الخلية البنفسجية (violet cell) التي تتميز بعمق قليل للمفرق وكان التأكيد على هذا النوع من الخلايا للحصول على تجميع جيد عند الاطوال الموجية فوق البنفسجية بقلة عمق المفرق السطحي وباستخدام طبقة طلاء غير عاكس وذات امتصاصية واطئة . اما الخلايا ذات السطوح المخشنة فقد اظهرت استجابة جيدة للضوء عند كافة الاطوال الموجية بسبب قلة الانعكاسية

ويزيد مجال السطح الخلفي من احتمالية التجميع بالنسبة للحاملات المتولدة قرب القطب الخلفي وبذلك تزداد الاستجابة للاطوال الموجية الطويلة ويمكن عمل القطب الخلفي من مادة عاكسة ليعطى فرصة ثانية للأطوال الموجية حتى تمتص . ويمكن



الشكل 8.16 (a) احتمالية التجميع لخلية ممثلة والخطوط المتقطعة تمثل شكل انتشار توليد الحاملات لثلاث اطوال موجية مختلفة للضوء . (b) كفاءة التجميع η_Q المناظرة كدالة لطول الموجي (c) الحساسية الطيفية (A/W) كدالة لطول الموجة .

لهذه السطوح الخلفية العاكسة (BSR) ان تحسن اداء الخلايا الرقيقة بصورة ملحوظة اضافة الى مساعدتها في ابقاء الخلية عند درجة حرارة واطئة اثناء العمل .

8-9 الخلاصة SUMMARY

تدخل في تصميم مفرق الخلايا الشمسية السليكونية الاعتبارات الاتية : يجب ان يكون مفرق p-n قريباً من سطح الخلية لتعطي اعلى نتاج من التيار . وهذا يسبب المعوقات بسبب المقاومة العرضية لهذه الطبقة مالم تعالج بتطعيمها بالشوائب بنسبة عالية والتطعيم الزائد في هذه الطبقة يؤثر على الخواص الالكترونية ويبعدها عن حالتها المثالية .

المقاومية المثالية لأرضية الخلية الشمسية تعتمد على وجود مجال السطح الخلفي وعدم وجوده . فاذا كان ذلك غير موجود فان المقاومية المثالية تتحقق بوضوح عند مستوى تطعيم الأرضية في مدى 10^{16} الى 10^{17} سم$^{-3}$ اما اذا كان موجوداً فان القيمة المثالية تصبح اقل اعتماداً على المقاومية وتتحقق عند مستويات تطعيم اوطأ .

وفي تصميم القطب العلوي في الخلية هناك بعض العناصر الحرجة والمحددة لفقد القدرة . وهذه العناصر هي شكل القطب المعدني والمقاومية الصفيحية لمعدن القطب ومقاومية طبقة الانتشار السطحي من الخلية وادنى عرض للاصابع المعدنية المسموح به تقنياً .

ويزيد الطلاء ربع الموجي غير العاكس من نتاج التيار للخلية الشمسية بمقدار 35-45% كما ان تخشين (texturing) سطح الخلية يؤدي الى اداء افضل على الرغم من وجود بعض المساوىء الخاصة به .

تمارين

8.1- تتكون خليـــــة سليكونيـــــة من طبقـة سطحيـة رقيقـة مطعمـة بصـورة منتظمة بالشوائب على شريحة سليكونية من نوع p- بسمك 150 مايكرون وسرعة اعادة الاتحاد السطحي على طول سطح الطبقة نوع n- كانت عالية . بفرض ان طول مسار الانتشار لحاملات الاقلية في هذه الطبقة كانت عالية جداً مقارنة بسمك هذه الطبقة . اشتق علاقة احتمالية التجميع لحاملات الاقلية كدالة للعمق الذي تتولد عنده هذه الحاملات . (ملاحظة : بما ان طول الانتشار كبير جداً مقارنة بسمك طبقة n- فان معدل اعادة الاتحاد تكون داخل متن المادة قليلة ومن الممكن اهمالها مقارنة بمعدل اعادة الاتحاد السطحي) .

8.2- احسب المقاومية الصفيحية لطبقة n- المذكورة في التمرين 8.1 اذا علم ان نسبة الشوائب في هذه الطبقة هي 10^{18} / سم^{3} وسمك الطبقة يساوي 0.5 مايكرون .

8.3- تم تصنيع مجموعة من الخلايا الشمسية التقليدية على رقائق من نوع p- بسمك 150 مايكرون . والخلايا التي لها اعادة اتحاد عالية عند القطب الخلفي تعطي تيار دائرة قصيرة 2.1 أمبير وفولتية دائرة مفتوحة 560 مليّ فولت . اما الخلايا التي لها مجال السطح الخلفي فانها تعطي تيار دائرة قصيرة 2.2 أمبير . اذا علم ان طول الانتشار لحاملات الاقلية في طبقة p- بعد التصنيع في الحالتين هو 500 مايكرون فما القيمة المثالية لفولتية الدائرة المفتوحة للخلايا التي لها مجال السطح الخلفي ؟

8.4- صمم القطب العلوي لخلية سليكونية مستطيلة 10 × 7.5 سم ثم احسب الفقد الكلي في القدرة لهذه الخلية . المقاومة الصفيحة لطبقة الانتشار في هذه الخلية 60 Ω/□ وتكون القدرةالقصوى عند فولتية 430 مليّ فولت وكثافة تيار 28 مليّ امبير/ سم^{2} تحت شمس ساطعة وللخلية ثلاثة توصيلات خارجية كلها على الجانب نفسه من الخلية .

يتم عملية التعدين باستخدام التبخير في الفراغ وباستخدام اقنعة معدنية وان ادنى عرض ممكن تقنياً هو 180 مايكرون . وتتضمن عملية التعدين طبقة رقيقة

من تيتانيوم (Titanium) (0.12 مايكرون) على سطح السليكون مباشرة وتليها طبقة رقيقة جداً (0.02 مايكرون) من البلاديوم (Palladium) وبعدها طبقة سميكة من الفضة بسمك 4 مايكرون . والمقاومة النوعية للتماس الناتج من وصل المعدن مع السليكون هي 200 مايكرو أوم – سم٢ والمقاومة لهذه المعادن هي 48 و 11 و 1.6 مايكرو أوم – سم٢ $\mu\Omega\text{-cm}^2$ على التوالي .

8.5- اذا اعتبرنا خلية بقطب علوي هندسي معين وللخلية والتعدين عناصر ثابتة . بين ان الفقد النسبي للقدرة بسبب هذا القطب يزداد بزيادة ابعاد الخلية .

المراجع

[8.1] J. G. FOSSUM et al., "Physics Underlying the Performance of Back-Surface-Field Solar Cells," *IEEE Transactions on Electron Devices ED-27* (1980), 785-791.

[8.2] A. S. GROVE, *Physics and Technology of Semiconductor Devices* (New York: Wiley, 1967), pp. 44-69.

[8.3] J. LINDMAYER AND J. F. ALLISON, *Conference Record, 9th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Silver Spring, Md.*, 1972, p. 83; also *Comsat Technical Review 3* (1972), 1.

[8.4] J. G. FOSSUM, F. A. LINDHOLM, AND M. A. SHIBIB, "The Importance of Surface Recombination and Energy-Bandgap Narrowing in *p-n* Junction Silicon Solar Cells," *IEEE Transactions on Electron Devices ED-26* (1979), 1294-1298.

[8.5] J. A. MINNUCCI et al., "Silicon Solar Cells with High Open-Circuit Voltage," *Conference Record, 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego*, 1980, pp. 93-96; also *IEEE Transactions on Electron Devices, ED-27* (1980), 802-806.

[8.6] H. B. SERREZE, "Optimizing Solar Cell Performance by Simultaneous Consideration of Grid Pattern Design and Interconnect Configurations," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D.C.*, 1978, pp. 609-614.

[8.7] C. E. FROBERG, *Introduction to Numerical Analysis* (Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1965), p. 19.

[8.8] A. FLAT AND A. G. MILNES, "Optimization of Multi-layer Front-Contact Grid Patterns for Solar Cells," *Solar Energy 23* (1979), 289-299.

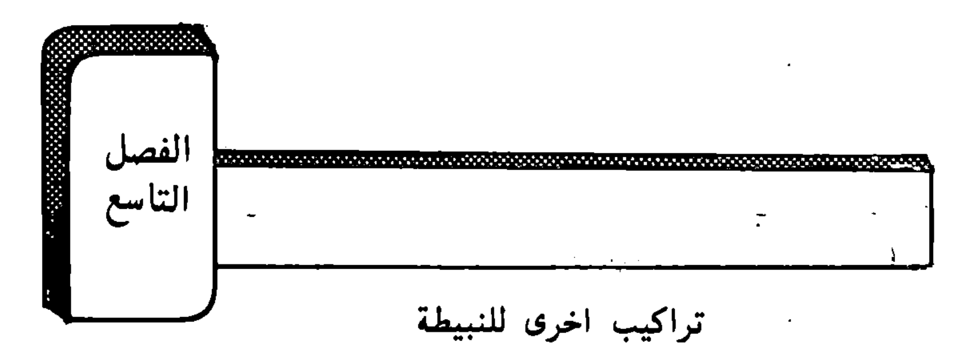
[8.9] G. A. LANDIS, "Optimization of Tapered Busses for Solar Cell Contacts," *Solar Energy 22* (1979), 401-402; R. S. Scharlack, "The Optimal Design of Solar Cell Grid Lines," *Solar Energy 23* (1979), 199-201.

[8.10] E. S. HEAVENS, *Optical Properties of Thin Solid Films* (London: Butterworths, 1955).

[8.11] E. Y. WANG et al., "Optimum Design of Antireflection Coatings for Silicon Solar Cells," *Conference Record, 10th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Palo Alto*, 1973, p. 168.

[8.12] M. G. COLEMAN et al., "Processing Ramifications of Textured Surfaces," *Conference Record, 12th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Baton Rouge*, 1976, pp. 313-316.

محمد يوسف الكويتي



تراكيب اخرى للنبيطة

OTHER DEVICE STRUCTURES

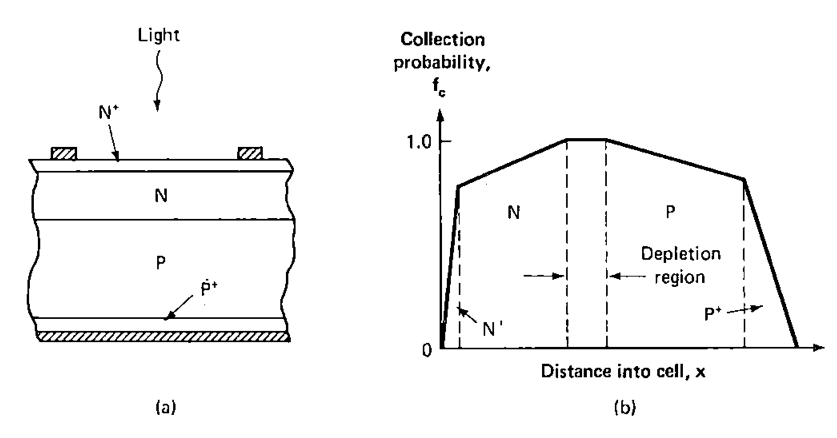
المقدمة INTRODUCTION

المبدأ الاساسي لعمل الفوتوفولطائي في نبيطة شبه الموصل هو اللاتناظر (asymmtry) في التركيب الالكتروني للنبيطة . اضافة الى الخلايا السليكونية p-n المارة الذكر في الفصول السابقة هناك عدد كبير من الطرائق لتكوين مثل هذا اللاتناظر وفي هذا الفصل نوجز مفاهيم العمل لعدد من نبائط مختارة .

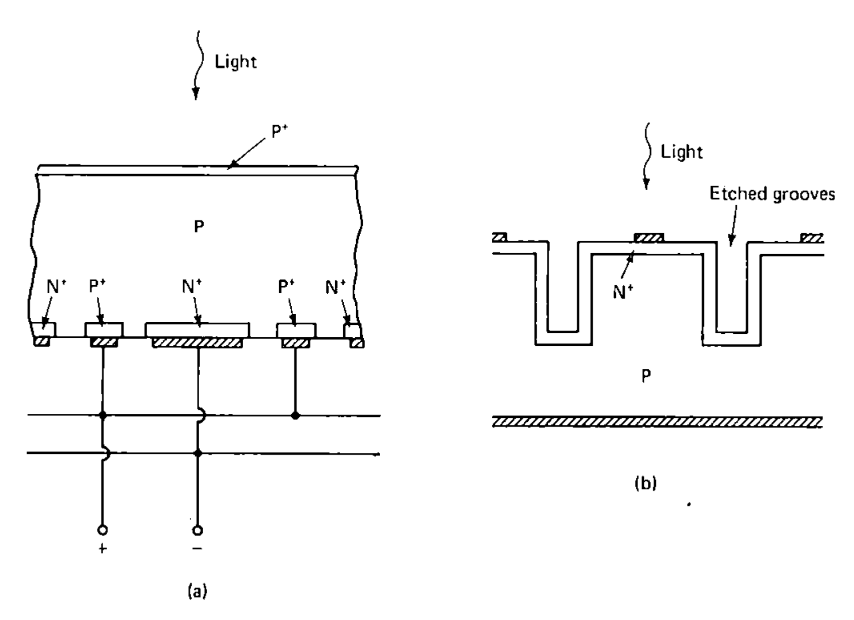
9.2 مفرق متجانس HOMOJUNCTIONS

الخلايا الشمسية السليكونية المألوفة هي خلايا من نوع مفرق متجانس (homojunction) . في هذه الخلايا يكون شبه الموصل المستخدم على جانبي المفرق من المادة نفسها ويكون الاختلاف فقط في نوع الشوائب ففي الفصل الثامن تم وصف الخلية الشمسية الاعتيادية ذات المفرق المتجانس قليل العمق والموازي للسطح المضاء • وبدلاً من عرض فهرسة للخلايا المتجانسة سنقتصر في هذه الفقرة على ثلاث نبائط معينة توضح مفاهيم مختلفة للمفرق المتجانس التركيب الاول : هو التركيب الباعث الواطىء العالي (high-low emitter structure) والمبين في الشكل (a) 9.1 ويساعد هذا التركيب على التغلب على التقيدات الموجودة في الطرائق الاعتيادية ويختلف عن تركيب p-n حيث ان المفرق يكون اعمق بكثير وكثافة التطعيم تكون معتدلة اكثر في الجانب العلوي من الخلية . ويستخدم مجال السطح الامامي (front surface field) عند السطح العلوي وتتغلب هذه الطريقة على التعقيدات المفروضة على فولتية الدائرة المفتوحة بواسطة طبقة الانتشار العلوية لتركيب الخلية الاعتيادية . وقد تم الاعلان عن تحسينات ملحوظة في فولتية الدائرة المفتوحة باستخدام هذه الطريقة (مرجع 9.1) . ان احتمالية

التجميع للحاملات المتولدة على امتداد النبيطة مبينة في الشكل (b) 9.1 . وفي هذه الحالة فان عملية التجميع لاتكون مثالية ولذا يكون التيار الناتج اقل من التيار الناتج من نبائط اخرى .



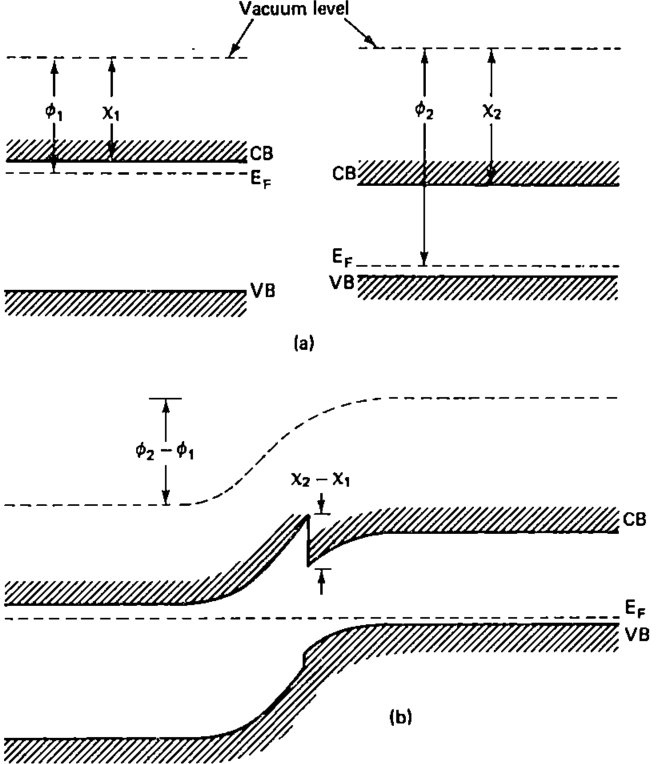
الشكل 9.1(a) الرسم التخطيطي لتركيب خلية شمسية بباعث واطيء ـ عالي (b) واحتالية التجميع المناظرة كدالة للمسافة من سطح الخلية



الشكل 9.2 طريقتان لتصميم الخلية الشمسية بمفرق متجانس :
a- خلية ذات مجال سطح امامي
b- خلية ذات مفارق مضاعفة عمودية

اما التركيب الثاني فهو خلية ذات مجال السطح الامامي كما في الشكل (a) 9.2 وفي هذا التركيب (مرجع 9.2) يمكن عمل قطبين للتوصيل الى الخارج من ظهر الخلية حيث يقلل من الفقد بواسطة التظليل الناتج عن القطب العلوي للخلية حيث يقلل الاعتيادية وكذلك يسهل التوصيل بين الخلايا . الا ان العمليات اللازمة لعمل هذه الخلية اكثر تعقيداً . ويجب ان تكون الخلية رقيقة مقارنة مع طول مسار الانتشار لحاملات الاقلية وذلك للحصول على نتاج كلي ومن المتوقع مجابهة صعاب في التعامل مع خلايا ذات مساحات واسعة عندما تكون رقيقة .

أما التركيب الثالث فهو استخدام مفارق عمودية على السطح الامامي من الخلية ، اي خلية ذات مفرق عمودي . فان احسن نموذج عملي لهذا النوع من التركيب هو خلية المفارق العمودية المتعددة (VMJcell) كما في الشكل (b)9.2 . حيث تحفر اخاديد عميقة على سطح الخلية باستخدام محلول كيمياوي متجانس الخواص (مرجع 9.3) وبعدها تطعيم الخلية بالشوائب لتعطي مفارق افقية



الشكل 9.3 (a) الرسم التخطيطي لحزمة الطاقة لقطعتين معزولتين من اشباع الموصلات المختلفة احداهما نوع -p والاخرى نوع -n .
(b)- الرسم التخطيطي لمفرق متباين مكون من اتصال هاتين القطعتين .

وعمودية . وتساعد المفارق العمودية على جمع الحاملات المتولدة في عمق الخلية . ولتكون هذه المفارق فعالة اكثر يجب ان تكون المسافة بينها بحدود طول مسار الانتشار للمادة . ومن حيث المبدأ يكون مثل هذا التركيب اكثر كفاءة عندما يكون مسار الانتشار قصيراً على الرغم من قصـر مسار الانتشار يعني ابعاداً اصغر بين هذه المفارق .

9.3 المفارق المتباينة لشبه الموصل

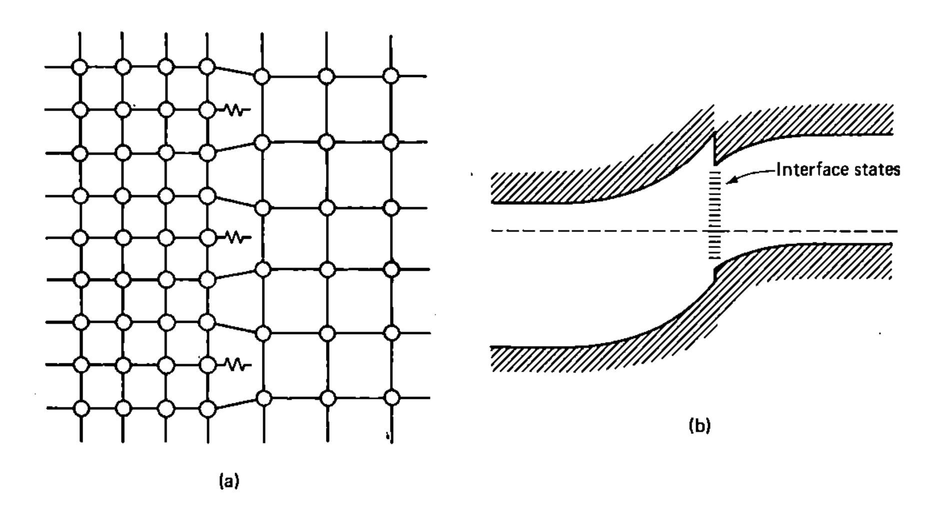
SEMICONDUCTOR EHTROJUNCTIONS

في هذه الخلايا يكون طرفا مفرق شبه الموصل من مادتين مختلفتين وفي الفقرة 2.4 تم التوصيل الى مخطط حزمة الطاقة للمفرق المتجانس بواسطة مفهوم بسيط وذلك بتلامس منطقتين منفصلتين من p-n ويمكن تكرار الطريقة نفسها لحالة المفرق المتباين وان الشكل 9.3(a) يبين الرسم التخطيطي لحزمة الطاقة للمادتين كل على انفراد وهناك ثلاثة عناصر مهمة : وهي دالة الشغل (الطاقة اللازمة لخلع الالكترون الواقع عند سطح فرمي) . وفناء الالكترون (electron affinity) الطاقة اللازمة للازاحة الالكترون الموجود عند حافة حزمة التوصيل . والفجوة المحظورة لشبه الموصل فمع الاختلاف في مستويات التطعيم بين قطعتي شبه الموصل هناك ايضاً الإختلاف في فناء الإلكترون ودالة الشغل والفجوة المحظورة للمادتين وعند تلامس المادتين وفي حالة التوازن الحراري ، فان مستوى فرمي يجب ان يكون ثابتاً على امتداد النبيطة كما مبين في الشكل 9.3(b) . وهذا يعني ان الجهد الكهروستاتيكي المتكون خلال النبيطة يجب ان يكون مساوياً للفرق بين دالتي الشغل . ومن الممكن حساب التوزيع الفضائي لهذا الجهد بدلالة الشحنات المخزونة في منطقة الانتقال على جانبي المفرق وبطريقة مشابهة لحالة المفرق المتجانس المذكورة في الفصل الرابع . اضافة الى ذلك فان حافة حزمة التوصيل تفقد التواصل عند المفرق وبمقدار يساوي الفرق بين الفناء الالكتروني X . وبالنسبة لحزمة التكافؤ فيعتمد عدم التواصل فيها على الاختلاف في الحزمة المحظورة ، وهذا مبين في الشكل 9.3(b) . ويكون متجه الازاحة (diplacement vector) متواصل خلال السطح البيني المثالي بدلاً من المجال الكهربائي الذي نلاحظه في حالة المفرق المتجانس .

ان النتوءات الموجودة في واحدة من الحزم كما في حزمة التوصيل الموضح في الشكل 9.3(b) غير مرغوبة في العملية الفوتوفولطائية وباستخدام مفهوم اللاتناظر في الخلية كما شرحناه في الفقرة 1.4 . تعمل منطقة نوع -n مجمعاً للفجوات

ومنطقة النوع -p تعمل مجمعاً للالكترونات . وان النتوء في حزمة التوصيل لمنطقة النوع -n الى منطقة -p وكما يعيق هذا النتوء اسهام منطقة -p في التيار الفوتوني (التيار الناتج بواسطة الفوتونات) ويمكن التخلص من هذه النتوءات باختيار مناسب للفناء الالكتروني ومستوى التطعيم (مرجع 9.4)

وبالنسبة للحالة المثالية اي في حالة وجود نتوءات صغيرة او غيابها كليا ، فان اقصى كفاءة للخلية المتباينة تتحدد بالكفاءة المثالية للمادة ذات الفجوة المحظورة الاقل . ولذا فان اختيار الخلايا المتباينة يكون لاعتبارات عملية اكثر من كونها ذات كفاءة اعلى .



الشكل 9.4 (a) العيوب الناتجة من عدم التوافق عند السطح البيني بين شبيكتين بثابت شبيكة مختلفة **(b)** حالات عيوب مناظرة في الفجوة المحظورة والناتجة من عدم التوافق هذا

وحتى الان لم يذكر في الدراسة اي شيء حول نقطة عملية مهمة وهو ان في المفرق المتجانس الاعتيادي يكون التركيب البلوري نفسه متواصلاً على امتداد المفرق بينما يتعذر ذلك في حالة المفرق المتباين ويرجع سبب ذلك الى الاختلافات الكبيرة في البنية البلورية للمادتين المكونتين للمفرق . ويظهر من الشكل 9.4(a) كيفية ظهور العيوب عند تلامس مادتين لهما نفس الشبيكة البلورية الا انهما مختلفان في ثابت الشبيكة وتعتمد كثافة هذه العيوب على درجة عدم المواءمة بين الشبيكتين . وينشأ عن هذه العيوب مستويات طاقة مسموحة ضمن الفجوة المحظورة كما موضح في الشكل 9.4(b) وتقع هذه المستويات ضمن منطقة الاستنزاف وتعمل

كمراكز اعادة اتحاد فعالة جداً وكذلك توفر مواضع لعمليات نفق الميكانيك الكمي (qauntum mechanical tunneling) لنقل التيار عبر المفرق وفي جميع الاحوال فانها تقلل من اداء الخلية الشمسية . ونعمل مفارق متباينة وبخواص قريبة من المثالية يجب استخدام اشباه موصلات بتركيب شبيكي مشابهة تقريباً .

9.4 مفارق معدن ـ شبه الموصل المتباينة

METAL–SEMICONDUCTOR HETEROJUNCTIONS

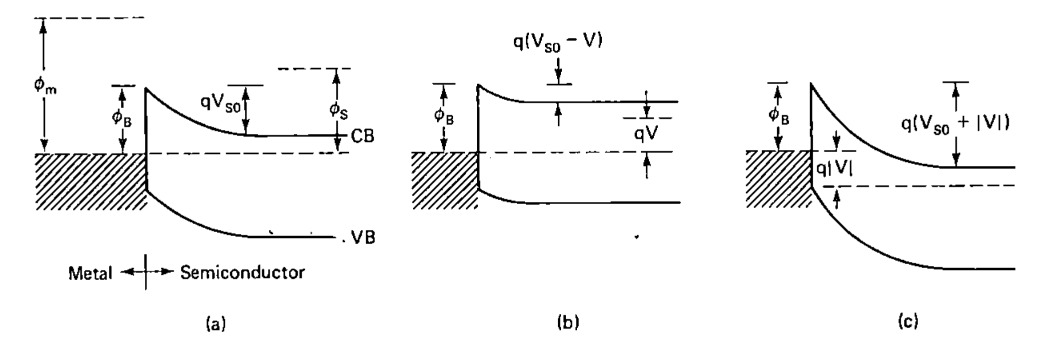
عندما يوصل شبه موصل والمعدن ، يحدث هبوط في الجهد في منطقة الاتصال وذلك بسبب الفرق في دالة الشغل كما في حالة المفرق المتباين لشبه الموصل . وبسبب الاختلاف في وفرة حاملات الشحنة في كل من المعدن وشبه الموصل فان معظم الهبوط يحدث في طرف شبه الموصل من المفرق كما في الشكل 9.5(a) . وهذا يؤدي الى تكوين منطقة استنزاف في السطح البيني كما هو الحال في مفرق p–n . ويبدو المعدن من حيث تأثيره على الخواص الكتروستاتيكي لمنطقة الاستنزاف كشبه موصل ذي درجة عالية من التطعيم .

ويعرف المفرق من نوع شبه الموصل ـ معدن الذي يكون منطقة استنزاف كهذه بثنائيات شوتكي . وهذه الثنائيات تجمع بين خواص التقويم والخواص الفوتوفولطائية في ان واحد . وان الحالة لحاملات الاقلية في طرف شبه الموصل تكون مشابهة لحالة الثنائي p-n ومثال على ذلك تعتمد الزيادة في تركيز حاملات الاقلية عند حافة منطقة الاستنزاف في حالة الظلام أسياً على الفولتية المسلطة وينحل اسياً الى متن المادة (فقرة 4.4 و 6.4) ولسريان حاملات الاقلية الاسهام نفسه في التيار الكلي للثنائي . ولشبه موصل من نوع –n :

$$J_{0h} = \frac{qD_h n_i^2}{L_h N_D} (e^{qV/kT} - 1) \qquad (9.1)$$

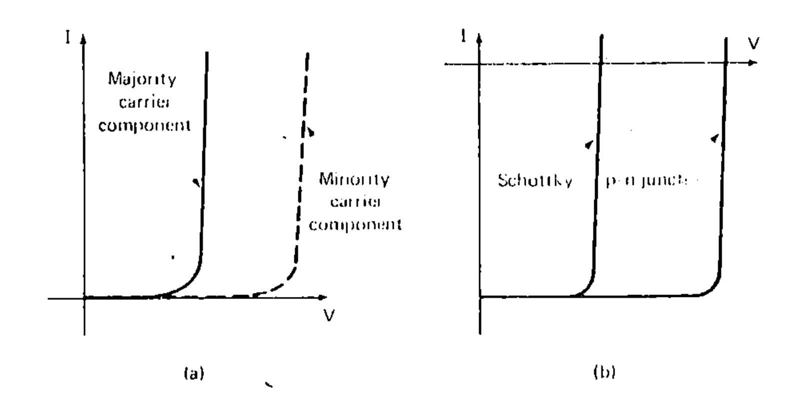
ان العائق الوحيد لسريان حاملات الاغلبية بين المعدن وشبه الموصل هو حاجز جهد منطقة الاستنزاف عند السطح البيني وارتفاع هذا الحاجز بتغير الفولتية المسلطة كما مبين في الشكل . 9.5(b) و 9.5(c) وينتج عن ذلك مركبة تيار الانبعاث الحراري (thermoionic emission) المعطى بالمعادلة (مرجع 9.5)

$$J_{0e} = A^* T^2 e^{-q\Phi_B/kT} \ (e^{qV/kT} - 1) \qquad (9.2)$$



الشكل **9.5** الرسم التخطيطي لحزمة الطاقة لمفرق غير متجانس معدن ــ شبه الموصل
(a)- انحياز صفر
(b)- انحياز امامي
(c)- انحياز خلفي

حيث A^* هو ثابت ريچاردسون (Richardson) الفعال ($A/cm^2/K^2$) (~30to120) وقيمة هذه المركبة تعتمد بصورة رئيسة على ارتفاع الحاجز عند السطح البيني ، ϕ_B وهذه المركبة لحاملات الاغلبية اعتيادياً اكبر من مركبة حاملات الاقلية كما مبين في الشكل (a) 9.6 .



الشكل **9.6** **(a)** مركبات التيار الظلامي لثنائي شوتكي
(b) المقارنة بين خصائص مفرق p–n ومفرق شوتكي في حالة الاضاءة

وهذه المركبة الاضافية غير مرغوبة من ناحيه التحويل الفوتوفولطائي، وذلك لانها تعمل على زيادة تيار الاشباع للثنائي ومن ثم يقلل فولتية الدائرة المفتوحة . وهذه التأثيرات مبينة في الشكل 9.6(b) لذلك كلما كان حاجز الجهد ϕ_B اكبر كان الاداء احسن .

وقد يبدو من السهل اختيار معدن ذي دالة شغل مناسبة بحيث يكون حاجز الجهد بين المعدن وشبه الموصل كبيراً . الا انه وجد عملياً ولعدد من اشباه الموصلات ان ارتفاع الحاجز لايعتمد على دالة الشغل للمعدن وهذا يعزى الى وجود عدد كبير جداً من المراتب عند السطح البيني لمفرق معدن شبه الموصل وهذه المراتب ناتجة من عدم مواءمة الشبيكة للمادتين او ربما بسبب التلوث الموجود على سطح شبه الموصل (مرجع 9.6) . وهذه كلها تعمل على خفض الجهد في المنطقة السطحية .

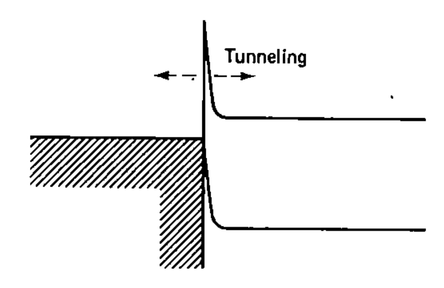
وبالرغم من ان ثنائيات شوتكي سهلة التصنيع وذلك لانها تتضمن تكوين مفرق p–n ، فان اداءها منخفض بسبب وجود مركبة تيار إضافي مع التيار المناظر لمفرق p-n .

9–5 اقطاب عملية ذات مقاومة واطئة

PRACTICAL LOW–RESISTANCE CONTACTS

ظهر من الفقرة 9.4 انه من النادر التحكم في الحاجز الموجود عند السطح البيني لشبه الموصل والمعدن باختيار معدن مناسب،وهذا يثير التساؤل عن كيفية الحصول على وصل معدني غير مقوم أو ذو مقاومة واطئة بين القطب المعدني وشبه الموصل ويكمن الجواب في فحص عرض منطقة الاستنزاف المرتبطة بالمفرق المقوم حيث يتقلص هذا العرض مع الزيادة في تركيز التطعيم .

والشكل 9.7 يبين الوصل بين معدن وشبه موصل ذي تطعيم عال التركيز وفي هذه الحالة تصبح منطقة الاستنزاف رقيقة جداً بحيث يمكن أن تمر الحاملات خلال هذه المنطقة المحظورة بواسطة عملية النفق الكمي (مرجع 9.7) . ويرجع هذا الى الطبيعة الموجية للألكترونات حيث تسمح للالكترونات أن تمتد خلال هذه المناطق ومع ان هناك حاجزاً رقيقاً عند السطح البيني ولكن الحاملات تمر بين المعدن وشبه الموصل وكأن الحاجز غير موجود . وهذا يعطي مفرقاً جيداً ذا مقاومة واطئة .



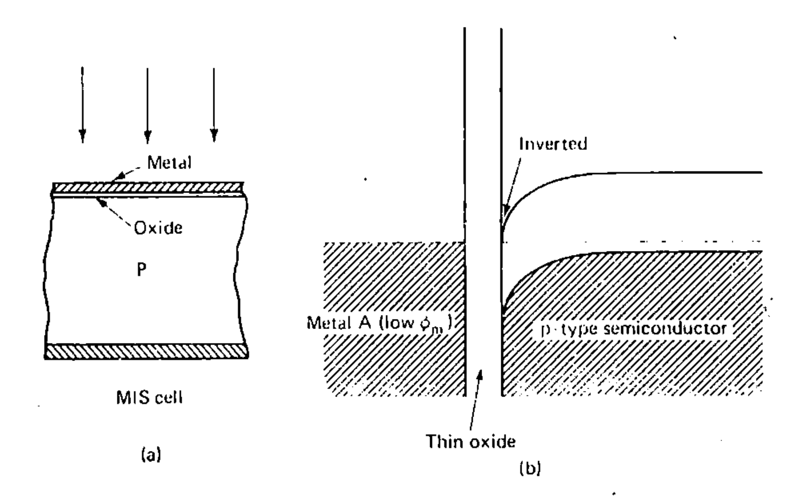
الشكل 9.7 الموصل بين معدن وشبه موصل بتطعيم مركز من نوع -n لجهد الحاجز في السطح البيني ضيق جداً بحيث تستطيع الحاملات ان تعبر خلاله بعملية نفق الميكانيك الكمي

وكنتيجة لذلك من الممكن عمل وصل معدني جيد بمقاومة واطئة مع خلية ذات طبقة عالية التطعيم اما الوصل المعدني الكهربائي مع المنطقة واطئة التطعيم نسبياً فيتم بواسطة عملية سبك بين المعدن وشبه الموصل والتي تؤدي الى تكوين طبقة مطعمة بصورة مركزة قرب الوصل المعدني. والسطح المتضرر « المقطوع » قد يمنع نشوء التقويم عند السطح البيني .

9-6 الخلايا الشمسية من نوع شبه موصل ـ عازل ـ معدن MIS SOLAR CELLS

لقد وجد أن خلايا شبه الموصل ـ معدن لاتعمل بصورة مناسبة لكثير من أشباه الموصلات وذلك لأن الحواجز في السطح البيني لاتعتمد بقوة على دالة الشغل للمعدن كما هو متوقع من الاعتبارات النظرية البسيطة . ويمكن التغلب على هذه المشكلة وذلك بادخال طبقة رقيقة من العازل بين المعدن وشبه الموصل كما في الشكل 9.8(a) لتكوين نبائط شبه الموصل ـ عازل ـ معدن وبذلك يكون للمعادن ذات الدالات الشغل العالية تأثير كبير على شبه الموصل .

وكمثال على ذلك فالنبيطة نوع -p الموضحة في الشكل 9.8(b)٠حيث تولد دالة الشغل الواطئة للمعدن حاجز جهد كبيراً عند سطح شبه الموصل . وإذا كانت طبقة العازل رقيقة جداً فإن الحاملات تكون قادرة على العبور خلالها بتأثير النفق الكمي ، والتيار الجاري خلال طبقة العازل هذه بواسطة هذه العملية يتزايد أسياً مع تناقص سمك هذه الطبقة . وإن العلاقة الرياضية لمركبة الانبعاث الحراري للتيار الظلامي المبينة في المعادلة (9.2) تأخذ الصيغة :



الشكل 9.8 (a) رسم توضيحي لتركيب معدن ـ عازل ـ شبه الموصل
(b) رسم مماثل لحزمة الطاقة

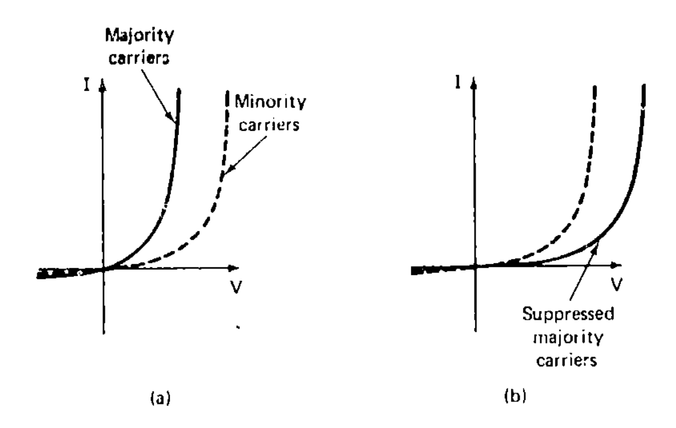
$$J_{0h} = P_h A^* T^2 e^{-q\phi_B/kT} \left(e^{q(V_{SO} - V_S)/kT} - 1\right) \qquad (9.3)$$

حيث V_S هو الجهد عند سطح شبه الموصل و V_{S0} هو قيمة هذا الجهد عند التوازن الحراري و P_h هو احتمالية مرور بجسم خلال النفق . كما ان وجود طبقة عازلة تقلل من المعدل الاقصى لعبورحاملات الاقلية بين المعدن وشبه الموصل . على كل حال عندما لايكون سمك طبقة اوكسيد اكثر مما ينبغي (نموذجياً تكون بحدود 20 انكستروم أو اقل) فإن معدل الانتقال في شبه الموصل (وهو على الأوطأ) هو الذي يحدد انتقال الحاملات بين المعدن وشبه الموصل وفي هذه الحالة يبقى انتقال حاملات الأقلية مشابه لحالة الثنائي p-n لذا يتحدد جريان التيار الظلامي وكما بينا في (فقرة 6-4) بالعلاقة

$$J_{0e} = \frac{qD_e n_i^2}{L_e N_A}\left(e^{qV/kT} - 1\right) \qquad (9.4)$$

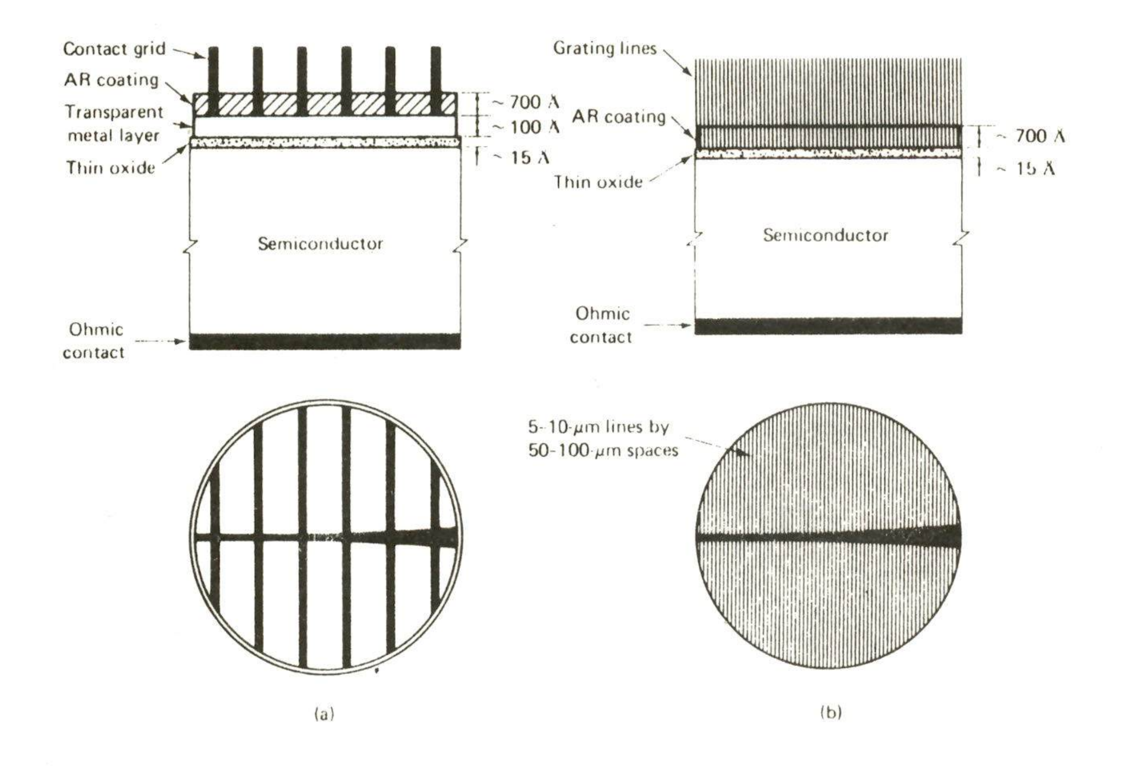
وبمقارنة القيم النسبية لمركبتي التيار الجاري في نبيطة شوتكي و MIS يظهر أن مركبة الأنبعاث الحراري للتيار تكبح في نبيطة MIS وذلك لامكانية الحصول على قيم اعلى لـ ϕ_B ولأن الحد الأضافي، أي إحتمالية النفق P_h يكون اقل بكثير من واحد. وقد يكون $(V_{S0} - V_S)$ في المعادلة (9.3) أصغر من الفولتية المسلطة وكما نلاحظ في الشكل 9.6 فإن هذا الكبح في التيار يسبب الزيادة في فولتية الدائرة المفتوحة.

يبين الشكل 9.9 الرسم التخطيطي للصورة النهائية للسلوك الكهربائي إذ أن مركبة التيار الحراري لهذه الحالة تم كبحها الى اقل قيمة بحيث يكون التيار من نوع p–n المعطى بالمعادلة 9.4 يكون طاغياً عليه ولذا فعلى الرغم من الاختلاف الكبير بينهما في التركيب، فإن النبيطة MIS مكافئة لثنائي مثالي من نوع p–n .



الشكل 9.9 المقارنة بين السلوك الكهربائي في الظلام لـ (a) ثنائي شوتكي و (b) خلية شمسية نموذجية من نوع MIS

في كلا النوعين من الخلايا الشمسية شوتكي و MIS يقوم المعدن بوظيفتين يعمل كقطب امامي ومولد للحاجز. ويتضح من الشكل 9.8(a) ضرورة ايجاد طريقة لتوصيل الضوء من خلال هذه الطبقة ويوضح الشكل 9.10 طريقتين من هذه الطرائق. الأولى هي استخدام طبقة معدن رقيقة جداً أي اقل من 100 انكستروم لتكون نافذة للضوء وهذه الطبقة تكون بمقاومية صفيحية عالية، لذا تتطلب شبكة توصيل اكثر سمكاً فوقها. والطريقة الثانية هي استخدام تركيب محزز (grating structure) والتي تشبه الى حدما القطب العلوي في الخلايا الاعتيادية ولكن تكون الحزوز اكثر دقة. وتتولد حاملات الشحنة بواسطة الضوء الممتص بين خطوط الحز وتمتلك هذه الحاملات فرصة جيدة للوصول الى خطوط



الشكل 9.10 طريقتان لتصميم القطب المعدني العلوي للخلايا الشمسية من نوع **MIS** :
(a) طريقة معدن شفاف
(b) النبيطة المحززة .

التوصيل قبل عملية اعادة الاتحاد ويمكن تحسين الأداء إذا أمكن توليد طبقة من حاملات الأقلية الكتروستاتيكياً على إمتداد السطح (مرجع 9.9) والطريقة الثالثة هي استخدام بعض الموصلات الشفافة مثل اكاسيد القصدير والأنديوم والخارصين والكادميوم . وهذه الاكاسيد هي في الحقيقة اشباه موصلات عالية التطعيم ولهذا يعرف التركيب بالخلايا شبه الموصل ـ عازل ـ شبه الموصل (SIS) (مرجع 9.10) وهذا التركيب للخلايا المتباينة الموضحة في الفقرة 9.3 .

ومن أهم فوائد نبيطة MIS هو التخلص من عملية الانتشار لعمل المفرق عند درجات الحرارة العالية وبذلك يمكن المحافظة على الخصائص الاساسية لمادة السليكون والتخلص من الاثار السلبية المرتبطة بالطبقة الانتشارية ولقد وجدنا في الفقرة 8.7 ان الخصائص غير المثالية لطبقة الانتشار تحدد الحد الأعلى لفولتية الدائرة المفتوحة في الخلايا السليكونية . وتم الحصول على فولتية دائرة مفتوحة

عالية جداً في خلايا MIS الحززة (مرجع 9.8) . وبما أن تيار الدائرة القصيرة لهذه النبيطة قريباً من تيار نبائط p-n ولها عامل ملء اكبر فإن كفاءتها تكون اعلى من نبيطة p-n ويعزى ذلك بصورة رئيسة الى الفولتية العالية الخارجة .

9-7. الخلايا الكهروضوئية الكيميائية
PHOTOELECTROCHEMICAL CELLS

9.7.1 مفرق شبه الموصل ـ سائل المتباين
Semiconductor-Liquid Hetrojunction

عند وصل شبه موصل مع سائل الكتروليتي يتكون حاجز جهد عند سطح شبه الموصل كالذي ينشا في المفارق المتباينة الاخرى في هذا الفصل . وإن تكوين مفرق سائل ـ شبه موصل لايتطلب الا الحد الأدنى من العمليات ومع ذلك فقد تم تسجيل كفاءات اعلى من 12% لهذا النوع من النبيطة (مرجع 9.11) . والمشكلة الرئيسة في هذه النوع من الخلايا هي تآكل شبه الموصل في المحلول بتأثير من الضوء (مرجع 9.12) .

ويمكن استخدام مثل هذه الخلايا الكهروضوئية(photoelectricalcells)بوجود قطب مضاد اما لتوليد الكهرباء أو لانتاج الهيدروجين عن طريق تحليل الماء .

9.7.2 الخلايا الفوتوفولطائية الكهروكيميائية
Electrochemical Photovoltaic Cells

يتكون السائل في هذه الخلايا من محلول يحتوي على جزيئات في حالة مؤكسدة (oxidized) وحالة مختزلة (reduced) فاذا اكتسبت هذه الجزيئات الكتروناً تتحول من حالة مؤكسدة الى حالة مختزلة ويحدث العكس اذا تخلت الجزيئة عن الكترون او اكتسبت فجوة فانها تعود الى الحالة المؤكسدة وهذا النوع من الجزيئات يعرف بازواج اكسدة واختزال (redox couples) .

في الخلية الفوتوفولطائية يقع مستوى الطاقة في المحلول الاليكتروليتي ذي ازواج أكسدة ـ وإختزال قرب مستوى الطاقة لحافة حزمة لحاملات الأقلية لشبه الموصل . وهذا موضح في الشكل 9.11(a) لحالة شبه موصل نوع n- مع قطب معدني مضاد .

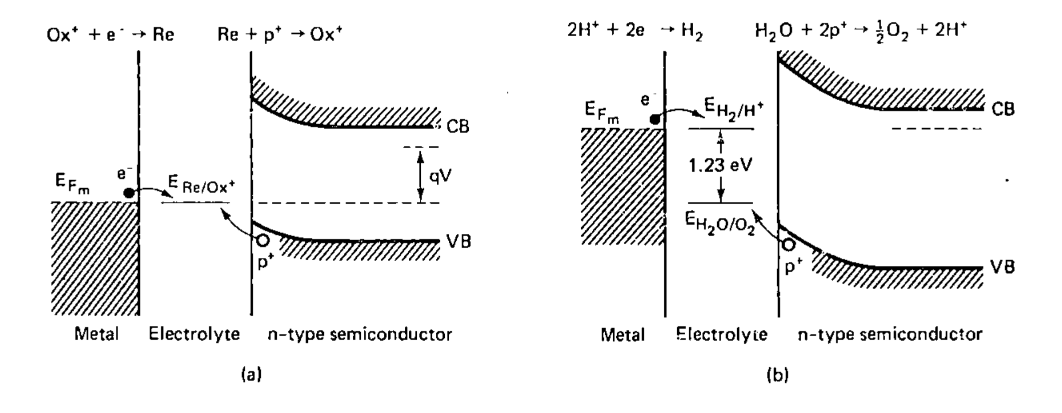
عند الأضاءة ، تتحرك حاملات الأقلية (الفجوات) المتولدة في شبه الموصل الى السطح البيني مع الالكتروليت لتنتقل الى الحالة المختزلة من ازواج الاكسدة والاختزال . بعد اختراقها السطح البيني كما موضح في الشكل 9.11(a) وتتأكسد وفق :

$$\text{Red} + p^+ \rightarrow \text{Ox}^+ \tag{9.5}$$

اما في التقطب المضاد فتنتقل الالكترونات من المعدن الى زوج الأكسدة والاختزال وهي في حالة مؤكسدة وتختزلها حسب المعادلة الاتية :

$$\text{Ox}^+ + e^- \rightarrow \text{Red} \tag{9.6}$$

فاذا ربط حمل بطرفي الخلية تكمل الدائرة الكهربائية وتجهز الحمل بالقدرة كما في كثير من الخلايا الشمسية الاعتيادية . يعمل المحلول الالكتروليتي في هذه الخلايا كوسط لنقل الشحنات بين المعدن وشبه الموصل . وتركيب هذه النبيطة قريب من تركيب MIS وهذا مبين بشكل أوضح في المرجع 9.13 .



الشكل 9.11 (a) رسم حزم الطاقة لخلية فوتوفولطائية من نوع الكهروكيميائي **(electrochemical)** تحت الأضاءة . مستوى ازواج اكسدة ـ اختزال **(redox couple)** في محلول الكتروليتي يساعد على نقل الشحنة بين المعدن وحزمة التكافؤ في شبه الموصل **(b)** رسم حزم الطاقة للخلية من نوع تحليل كهروضوئي **(photoelectrolysis)** تحت الأضاءة . وتعمل النبيطة بصورة مثالية عند جعل المعدن والجانب الآخر لشبه الموصل دائرة قصيرة .

9.7.3 خلية التحليل الكهروضوئي Photoelectrolysis Cell

تشبه هذه الخلايا كثيراً الخلية الموصوفة في الفقرة 97.2 وتستخدم ايضاً لانتاج وقود كيميائي بواسطة عملية التحليل الكهروضوئي والهيدروجين هو الوقود المنتج عادة بواسطة عملية التحليل الكهروضوئي للماء.

وبالنسبة للخلية ذات شبه موصل من النوع n- تجري التفاعلات كما في الفقرة 9.7.2 . فتفاعل التأكسد يحدث في الالكتروليت قرب حافة شبه الموصل بينما تفاعل الاختزال يحدث قرب القطب المعدني المضاد . اما الاختلاف هنا مع الحالة المذكورة في الفقرة 4.7.2 فهو أن الجزيئات المتفاعلة عند كل قطب تكون مختلفة . فعند تحليل الماء مثلاً فالتفاعل عند قطب شبه الموصل يكون (مرجع 9.14) :

$$H_2O + 2p^+ \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + 2H^+ \qquad (9.7)$$

وعند القطب المعدني المضاد :

$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2 \qquad (9.8)$$

والاختلاف في الطاقة بين حالتي التفاعل هذه يساوي 1.23 الكترون فولت كما مؤشر في الشكل 9.11(b) . وهذا يضع حداً أدنى للحزمة المحظورة في شبه الموصل لضمان استمرار التفاعل . وان جميع أشباه الموصلات باستثناء التي لها فجوات محظورة اكبر بكثير من الطاقة اعلاه تتآكل عند هذا النمط من العمل (مرجع 9.12) .

ان أول شبه موصل وجد ليعمل بحالة مستقرة في عملية التحليل الكهروضوئي هو ثاني اوكسيد التيتانيوم في محلول مائي. وبما ان الفجوة المحظورة لهذه المادة بحدود (3 الكترون فولت) فإنها تستجيب فقط للأشعة فوق البنفسجية ولهذا تكون كفاءة هذه الخلايا لتحويل الطاقة الشمسية واطئة (1%) . في الحقيقة أن ضعف هذه المادة في امتصاص أشعة الشمس يجعلها صالحة للاستخدام كطلاء غير عاكس عديم الامتصاص في بعض الخلايا السليكونية التجارية . وتحتاج نبيطة TiO_2 الى إنحياز قليل (0.3 الى 0.5 فولت) من مجهز قدرة خارجية لتستمر عملية التفاعل ولأجل التخلص من الحاجة لفولتية الانحياز تجري البحوث للحصول على شبه موصل بفجوة محظورة له إستقرارية معينة .

4.8 الخلاصة SUMMARY

وصفت اشكال مختلفة من التراكيب الممكنة للنبائط الفوتوفولطائية غير التركيب التقليدي ذي المفرق المتجانس غير العميق المذكور في الفصول السابقة حيث تم وصف بعض هذه التراكيب المختلفة في هذا الفصل . والكفاءة الحقيقة للمفارق الناشئة من وصل شبه الموصلين بفجوة محظورة مختلفة لاتفوق كفاءة المفارق المتجانسة . الا أننا سنلاحظ في الفصل العاشر غالباً بعض المزايا التقنية في التصنيع . ويمكن عمل المفارق المتباينة معدن ــ شبه موصل بسهولة . الا انها بكفاءة اقل من المفارق المتجانسة ويرجع سبب ذلك الى المركبة الاضافية الدخيلة من التيار . وفي جميع الاحوال فإن استخدام مفارق متباينة من نوع MIS المكونة من شبه موصل ــ عازل ــ معدن تقلل او تلغى تماماً هذا القصور .

وتمتلك المفارق المتكونة من السوائل وشبه الموصل ايضا خواص نوتوفولطائية مهمة . للأغراض الفوتوفولطائية ويمكن عمل خلايا مختبرية بسهولة وبكفاءة مقبولة . اما في عملية التحليل الكهزوضوئي ، فأن ضوء الشمس يتحول مباشرة الى طاقة كيميائية وغالباً ماتكون هذه الطاقة على شكل هيدروجين مخزون . وان الربط بين توليد الطاقة هذه وخزنها يؤدي الى امكانيات مهمة في هذا المجال على شرط ان يتحسن كفاءات تحويل الطاقة بشكل ملحوظ بحيث تفوق ماتحقق حتى الآن .

تمارين

9.1. (a) كثافة تيار الاشباع الظلامي في مفرق مصنوع من مادة 1 عند درجة حرارة الغرفة يساوي 10^{-8} امبير/ م٢ . وفي خلية مماثلة من مادة 2 هي 10^{-11} امبير/ م٢ ، أي من المادتين تتوقع ان تكون لها فجوة محظورة اصغر؟
(a)اذا تكون مفرق p-n متباين من هاتين المادتين . بفرض عدم وجود نتوءات محددة للتيار عند المفرق وتركيب بلوري مشابه للمادتين وبوجود درجة كبيرة من المواءمة . ضمن كثافة تيار الاشعاع الظلامي المتوقع من هذا المفرق المتباين.
أي من المادتين اكثر اهمية لتحدي فولتية الدائرة المفتوحة للخلية؟
(c) أي من المادتين تضع الحد الاعلى لعدد ازواج الكترون ـ فجوة المتولدة في مفرق متجانس ومن ثم تحديد تيار الدائرة القصيرة؟

9.2. (a) أوجد نسبة الاسهام لكثافة تيار الاشباع الظلامي لخلايا شوتكي بطريقة الانبعاث الايوني الحراري فوق الحاجز الموجود عند السطح البيني لشبه موصل ـ معدن وبانتشار الحاملات الاقلية خلال متن شبه الموصل عند درجة حرارة 300 كلفن . علماً بان شبه الموصل هو من السليكون من نوع n- وعند درجة حرارة 300 كلفن $L_h = 10^{-4}$ m, $D_h = 0.001$ m²/s, $N_D = 10^{22}$ m^{-3}, $n_i = 1.5 \times 10^{16}$ m^{-3} . وبارتفاع الحاجز عند السطح البيني هو 0.8 الكترون فولت وثابت ريچاردسون الفعال 10^6 A/m²/K²

(b) اذا كان تيار الدائرة القصيرة بحدود 300 أمبير/ م٢ تحت تأثير شمس ساطع (1 kW/m²) فما القيمة المثالية لفولتية الدائرة المفتوحة والكفاءة .

9.3. تم عمل خلية MIS بتركيب مشابه لخلايا شوتكي في تمرين 9.2 افرض ان للنبيطة افضل اداء وذلك بجعل مركبة تيار الانبعاث الايوني أوطأ بكثير من تيار انتشار حاملات الاقلية . احسب قيمة فولتية الدائرة المفتوحة والكفاءة . ثم قارن هذه النتائج مع نتائج تمرين 9.2 .

4. خلية تحليل كهروضوئي مبنية على ثاني اوكسيد التيتانيوم تولد هيدروجين عند سطح الثنائي تحت ضوء شمس ساطع (1 kW/m²) وتحتاج الخلية الى فولتية انحياز

0.4 فولت لتشغيل وتسحب تيار مصدر فولتية الانحياز بحدود 7 امبير/ م٢ من مساحة الخلية . والقدرة التي يمكن ان تستخرج من الهايدروجين تساوي 1.48I حيث I تيار الخلية و 1.48 هو الفولتية المكافئة لحرارة احتراق الهايدروجين . فما هي كفاءة تحويل الطاقة الشمسية لهذه الخلية .

REFERENCES المراجع

[9.1] F. A. Lindholm et al., "Design Considerations for Silicon HLE Solar Cells," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D.C.*, 1978, pp. 1300-1305; also C. T. Sah et al., *IEEE Transactions on Electron Devices ED-25* (1978), 66.

[9.2] O. Van Roos and B. Anspaugh, "The Front Surface Field Solar Cell, a New Concept," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D.C.*, 1978, pp. 1119-1120.

[9.3] J. Wohlgemuth and A. Scheinine, "New Developments in Vertical Junction Silicon Solar Cells," *Conference Record, 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego*, 1980, pp. 151-155.

[9.4] W. D. Johnston, Jr., and W. M. Callahan, *Applied Physics Letters 28* (1976), 150.

[9.5] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices* (New York: Wiley, 1969), p. 378.

[9.6] Ibid, p. 372.

[9.7] B. Schwartz, ed., *Ohmic Contacts to Semiconductors* (New York: Electrochemical Society, 1969).

[9.8] M. A. Green, F. D. King, and J. Shewchun, "Minority Carrier MIS Tunnel Diodes and Their Application to Electron- and Photo-voltaic Energy Conversion: Theory and Experiment," *Solid State Electronics 17* (1974), 551-572; R. B. Godfrey and M. A. Green, "655 mV Open Circuit Voltage, 17.6% Efficient Silicon MIS Solar Cells," *Applied Physics Letters 34* (1979), 790-793.

[9.9] P. Van Halen, R. E. Thomas, and R. Van Overstraeten, "Inversion Layer Silicon Solar Cells with MIS Contact Grids," *Conference Record, 12th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Baton Rouge*, 1976, pp. 907-912.

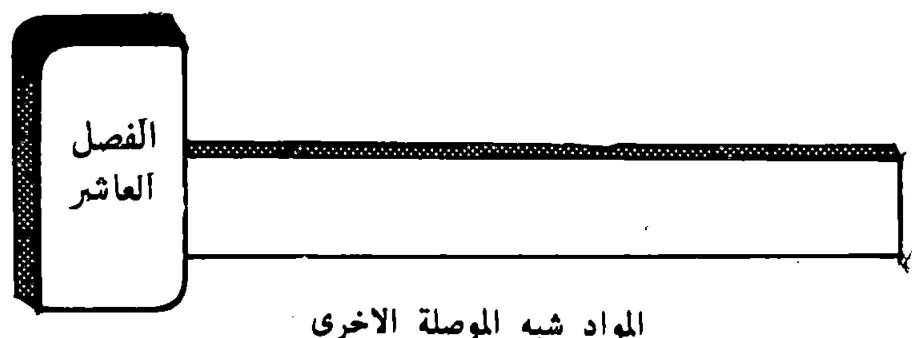
[9.10] R. Singh, M. A. Green, and K. Rajkanan, "Review of Conductor-Insulator-Semiconductor (CIS) Solar Cells," *Solar Cells 3* (1981), 95-148.

[9.11] A. Heller, B. A. Parkinson, and B. Miller, "12% Efficient Semiconductor-Liquid Junction Solar Cell," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D.C.*, 1978, pp. 1253-1254.

[9.12] H. P. Maruska and A. K. Ghosh, "Photovoltaic Decomposition of Water at Semiconductor Electrodes," *Solar Energy 20* (1978), 443-458.

[9.13] S. Kar et al., "On the Design and Operation of Electrochemical Solar Cells," *Solar Energy 23* (1979), 129-139.

[9.14] A. J. Nozik, "Electrode Materials for Photoelectrochemical Devices," *Journal of Crystal Growth 39* (1977), 200-209.



المواد شبه الموصلة الاخرى

OTHER SEMICONDUCTOR MATERIALS.

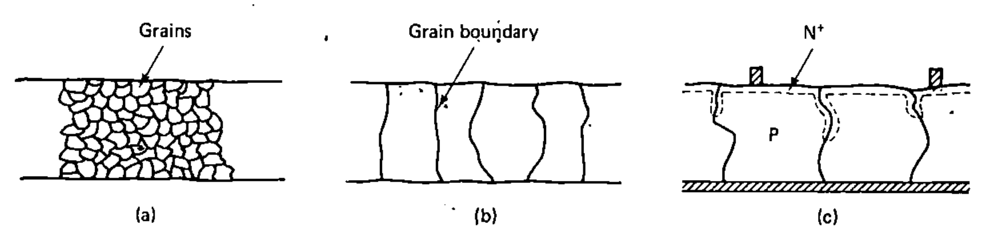
10.1 المقدمة INTRODUCTION

ان المادة شبه الموصلة التي تم التركيز عليها في الفصول السابقة هي مادة السليكون احادي البلورة وهناك في الحقيقة عدد كبير من اشباه الموصلات غير السليكون يمكن ان تصنع منها خلايا شمسية بكفاءة مقبولة (المرجع 10.1). ونحاول في هذا الفصل ذكر هذه المواد ثم مناقشة تركيب وخواص الخلايا الشمسية المصنوعة من بعض المواد المتطورة الى درجة يمكن ان تكون بديلة لمادة السليكون البلوري. وهذا يساعد على توضيح بعض الاعتبارات التي ربما تكون مهمة لكثير من المواد الاخرى.

10.2 السليكون متعدد البلورات POLYCRYSTALLINE SILICON

التقنيات المستخدمة لتحضير السليكون متعدد البلورات بصورة عامة تكون أقل صعوبة من تلك المطلوبة لانتاج السليكون احادي البلورة. ان درجة النقاوة في السليكون الخام المستخدم لانتاج مادة متعدد البلورات يجب ان تبقى مشابهة لتلك المستخدمة في انتاج سليكون احادي البلورة اذا اريد الحصول على خلايا فوتوفولطائية بكفاءة مقبولة. غير انه يبقى التساؤل عن الخاصية التي يمتلكها السليكون متعدد البلورات لينتج خلايا شمسية مقبولة.

ان المناطق المهمة في الخلايا متعدد البلورات هي الحدود الواقعة بين الحبيبات (grain) البلورية حيث يظهر حاجز الكتروستاتيكي على جانبي حدود الحبيبات (مرجع 10.2) مشابهاً لحالة المفارق المتباينة في شبه الموصل ـ معدن (فقرة 9.3) وهذا يعمل على اعاقة جريان حاملات الاغلبية مما يجعلها يبدو كمقاومة كبيرة

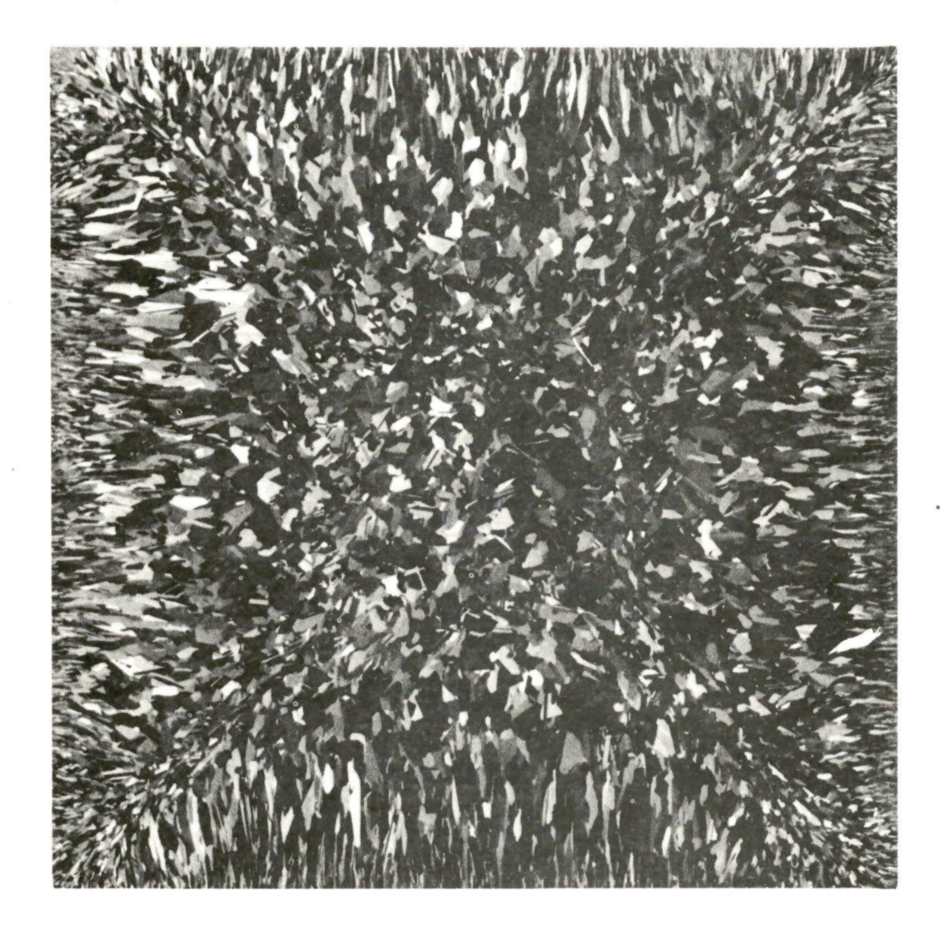


الشكل 10.1 (a) شبه موصل متعدد البلورات بحبيبات ناعمة
(b) متعدد البلورات بتركيب حبيبي عمودي تمتد عبر سمك الشريحة (c) افضلية الانتشار للشوائب بامتداد حدود الحبيبات اثناء تحضير الخلية .

متوالية . وهذا يجعل التركيب الحبيبي للبلورة المبين في الشكل (b) 10.1 ، أو تكون الحبيبات على شكل اعمدة تمتد من وجه الخلية الى الوجه الآخر مفصلا على التركيب الموضح في الشكل 10.1(b) حيث تكون حدود الحبيبات في كل اتجاه . ويكون حدود الحبيبات عيوباً في البلورة ، فإنها تسبب تكوين مستويات طاقة مسموحة في الفجوة المحظورة لشبه الموصل وتعمل هذه المستويات كمراكز اعادة اتحاد فعالة جداً . وهذا العيب يمكن اعتباره كحوض تصريف لحاملات الاقلية . فحاملات الاقلية التي تتولد ضمن مدى طول الانتشار من حدود الحبيبات تنجذب نحو الحدود لتتحد مع هذه المراكز مثلها مثل حاملات الاقلية التي تتولد ضمن طول الانتشار في مفرق الخلية الشمسية وتتجمع عند المفرق . ان هذه الحاملات لا تسهم في تيار الناتج من الخلية . وفي النتيجة يتبين مما سبق ان الابعاد العرضية للحبيبات في متعدد البلورات يجب ان تكون كبيرة مقارنة مع مسار الانتشار لحاملات الاقلية وذلك لتجنب الفقد في كمية التيار الناتج (مرجع 10.3) . والتأثير السلبي الآخر الذي ينجم عن حدود الحبيبة هو ان هذه الحدود توفر مسارات متوازية (Shunting) لجرى التيار عبر مفرق p-n . وهذه المسارات الموصلة ربما تتكون بسبب افضلية عملية الانتشار للشوائب في حدود الحبيبة في مرحلة تكوين المفرق كما مبين في الشكل 10.1(c) وكذلك يتوقع ان تسهم الكثافة العالية للترسبات عند حدود الحبيبة في هذه المسارات المتوازية .

وبما ان السليكون هو شبه موصل ذو فجوة محظورة غير مباشرة وضعيفة الامتصاص للضوء فإنه يحتاج الى مسارات انتشار كبيرة أي بحدود 0.1 ملمتر واذا كان للخلايا الفوتوفولطائية ان تكون جيدة لتجنب الخسارة الناتجة من اعادة الاتحاد عند حدود الحبيبة يجب ان تكون الحبيبات بابعاد جانبية اكبر بكثير من 0.1 ملمتر أي بحدود عدة ملمترات وربما يكون سمك الخلايا اعتيادياً اقل من ملمتر فإن هذه الحبيبات الكبيرة تمتد الى السطح الخلفي وبذا يكون من السهل تحقيق

ما موضح في الشكل (b) 10.1 . وكما ان الطول الكلي لحدود الحبيبة لكل وحدة مساحة في الخلية يتناقص بتزايد حجم الحبيبة وبذلك يقل تأثير المسارات المتوازية التي تنشأ من حدود الحبيبات.



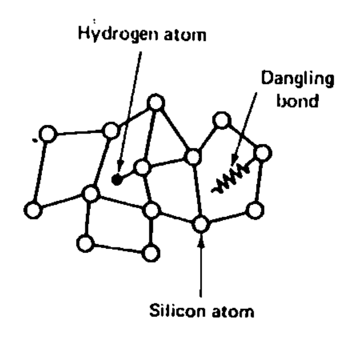
الشكل 2–10 شريحة 10 × 10 سم من السليكون متعدد البلورات تم قطعها من القالب (ingot) التي تكون بعملية الصب ويمكن عمل الخلايا الشمسية منها بكفاءة 10% بصورة اعتيادية .

ان الحبيبات الكبيرة في هذه المادة اكبر بكثير من تلك التي تتواجد في تركيب متعدد البلورات ولذا يكون من المناسب لتسمية التركيب بهذا الحجم من الحبيبات بالتركيب شبه البلوري والشكل 10.2 يبين شريحة من سليكون شبه بلوري مأخوذ من قالب مكعب الشكل . وفي عام 1976 وجد ان كفاءة الخلايا الشمسية

التي يمكن صنعها من هذه المادة تزيد على 10% (المرجع 10.42) كما تم تسجيل كفاءة تزيد على 14% باستخدام مادة سليكون لحبيبات اكبر (مرجع 10.5) وتتوفر حالياً الواح شمسية تجارية من السليكون شبه البلوري .

10.3 السليكون غير البلوري AMORPHOUS SILICON

يكون تحضير السليكون غير البلوري اقل صعوبة من سليكون متعدد البلورات والمادة غير البلورية تختلف عن المادة البلورية حيث تفتقر الاولى الى المدى الطويل (long range) من الترتيب البنائي للذرات . وكمثال على ذلك ذرات السليكون غير البلوري تتآصر بصورة عامة مع ذرات سليكون اخرى . والزوايا بين الأواصر التي توصل بين هذه الذرات وأطوال الاواصر بصورة عامة تكون متشابهة لتلك الموجودة في المادة البلورية ولكن الانحرافات الصغيرة فيها تؤدي بسرعة الى فقدان الترتيب ذي المدى الطويل كلياً .



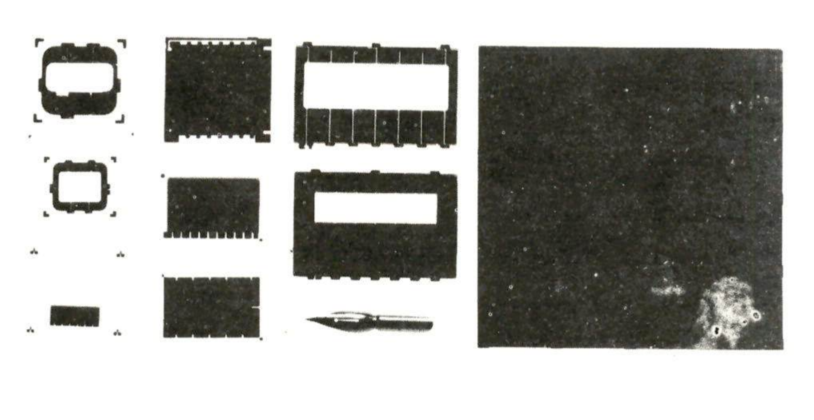
الشكل 10.3 تخطيط توضيحي لتركيب السليكون غير البلوري يبين كيفية تكوين الاواصر السائبة وكيفية كبح فعاليتها بالهايدروجين .

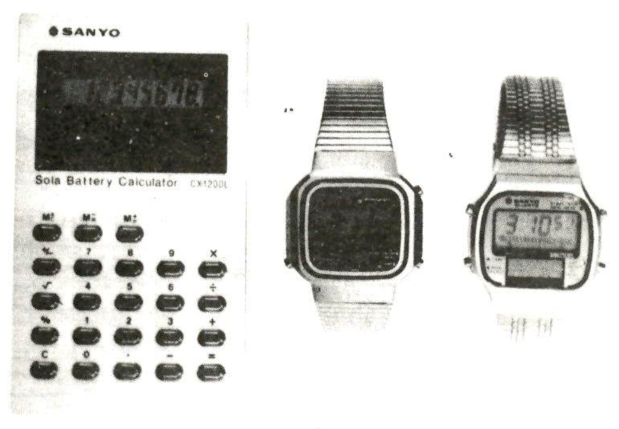
ولا يظهر عنصر السليكون غير البلوري النقي أي خواص فوتوفولطائية جديرة بالاهتمام . وعند فقدان الترتيب الدوري للمادة يكون من الصعب على كل ذرة أن تتآصر مع اربع ذرات اخرى مما يؤدي الى حدوث فجوات صغيرة جداً (microvoids) في تركيب المادة وتكون مرتبطة بوجود اواصر سائبة (dangling bonds) وهذا يعنى انه بسبب الترتيب غير الدوري للذرات تظهر كثافات عالية من مستويات الطاقة في الفجوة المحظورة الاعتيادية . وهذا مما يجعل من المتعذر تطعيم شبه الموصل بصورة فعالة أو الحصول على ديمومة مقبولة لحاملات الشحنة .

ومع ذلك فقد اعلن في عام 1975 (مرجع 10.6) ان بالامكان تطعيم الاغشية السليكونية غير البلورية المرسبة بطريقة التحليل بالتفريغ التوهجي لغاز سالين SiH_4 والحصول على مفرق p-n فلقد وجد ان هذه الاغشية تحتوي على الهايدروجين (وهو ناجم عن تحليل SiH_4) وبنسبة مقبولة من العدد الكلي للذرات (5-10%) ان دور الهيدروجين في هذه الحالة هو اشباع الاواصر السائبة في الفجوات الصغيرة والعيوب الاخرى في تركيب الغشاء كما مبين في الشكل 10.3 . وبذلك يقلل من كثافة مراتب الطاقة في الفجوة المحظورة مما يساعد على امكانية تطعيم المادة .

نشر في عام 1976 (مرجع 10.7) التوصل الى كفاءة بحدود % 5.5 لخلية شمسية تم تحضيرها من سبيكة السليكون غير البلوري المهدرج **(a-Si:H alloys)** وكانت مساحة الخلية صغيرة ومصنوعة بتركيب MIS وهذه التقنية لفتت اهتمام الباحثين حيث تم بالطريقة نفسها تحضير خلايا بمساحات اكبر بتركيب p-n و MIS وبكفاءات مقاربة لهذه الكفاءة (مرجع 10.8) . ان شبكة a-Si:H لها فجوة محظورة اكبر من السليكون البلوري ولها قابلية امتصاص اكبر للضوء ، وهذا يعني ان اغشية بسمك 1 مايكرون تكون كافية لعمل الخلية ويمكن ترسيب هذه المادة على ارضيات مختلفة . اما طريقة تطعيم هذه المادة فتكون باضافة كميات قليلة من الغازات المحتوية على الشائبة المطلوبة خلال عملية الترسيب وتبين من النتائج التحريبية أن مسارات حاملات الاقلية في هذه المادة تكون صغيرة واقل بكثير من 1 مايكرون . وهذا يعني أن منطقة الاستنزاف تمتد الى الجزء الأكبر من منطقة تجمع الحاملات الفعالة في الخلية ، فما تسبب المقاومة المتوالية لهذه المادة مشكلة . الا أن انخفاض قيمة المقاومة عند اضاءة الخلية (تاثير التوصيليه الضوئية) قد تحل هذه المشكلة الى حدما .

وبما أن الخلايا تكون سهلة الترسيب ، فليس من الصعب صناعة عدة خلايا متصلة على أرضية واحدة . وفي هذا فائدة كبيرة حيث يساعد على ابقاء مساحة الخلية المنفردة صغيرة وبذا تنعدم الحاجة الى شبكة توصيل معدني (مرجع 10.9) . إن أول انتاج تجاري من هذه الخلايا ظهرت في عام 1980 حيث تم توصيل عدد من هذه الخلايا على ارضية واحدة كما في الشكل 10.4(a) وكانت لهذه الخلايا الفولتية والتيار المطلوبة لتجهيز القدرة للسلع الاستهلاكية المبينة في الشكل 10.4(b) . وتزيد كفاءة هذه الخلايا على 3% تحت ضوء الشمس وهذه تناظر كفاءة خلايا السليكون احادي البلورة تحت ضوء فلوري (fluoresent light) . ولازال العمل مستمراً في مختبرات البحوث في جميع انحاء العالم لأيجاد مادة مبنية على





الشكل **10.4** اول مصفوفة شمسية من نوع السليكون غير البلوري تم تصميمها للاستخدام العام **(b)** حاسبة وساعات تعمل بهذه الخلايا (صورة من شركة **Sanyo Electric CO.Ltd.**)

السليكون غير البلوري لتعطى كفاءة مماثلة تحت اشعة الشمس وفي هذه السياق من التطور تم استخدام اغشية سليكون غير بلوري يتضمن تركيبها الهيدروجيني والفلور معاً (مرجع 10.10) وتم تحضير المركب (a–Si :H:F) بعملية التفريغ التوهجي لغاز SiF_4 بوجود الهيدورجين . وهذه التقنية الجديدة تقود الى الحصول على كثير من الخواص المرغوبة في العملية الفوتوفولطائية وخاصة إنه تقلل من كثافة مراتب الطاقة في الفجوة المحظورة . (المرجع 10.10) .

10-4 خلايا زرنيخيد الكاليوم
GALLIUM ARSENIDE SOLAR CELLS

10.4.1 خواص Properties of GaAs

زرنيخيد الكاليوم (GaAs) هو نموذج لشبه موصل مركب compound semiconductor) وله تركيب بلوري مشابه لتركيب السليكون (الشكل 2.3) ما عدا تتالي ذرات Ga و As مع بعضها. وله فجوة محظورة مباشرة (فقرة 3.3.1) وهذا يعني ان ضوء الشمس يمتص بسرعة بعد سقوطه عليه وان ديمومة حاملات الاقلية ومسارات الانتشار صغيرة مقارنة مع السليكون البلوري. وهذه الاختلافات تؤدي الى مفاهيم مختلفة في تصميم الخلية

ان تقنية التعامل مع GaAs هي تقنية متطورة وذلك لاهميتها التجارية فهي تستخدم لعمل الخلايا الباعثة للضوء وليزرات اشباه الموصلات وأحد وجوه هذه التقنية هو الافادة من سبيكة Ga As و AlAs. والمادة الاخيرة هي شبه موصل ذو فجوة محظورة غير مباشرة $(E_g \approx 2.2\ eV)$ وتركيبها البلوري مشابه لـ GaAs ولها نفس ثابت الشبيكة تقريباً (بانحراف 0.14% فقط) ويعبر عن السبيكة GaAs و AlAs اعتيادياً بالشكل $Ga_{1-x}Al_xAs$, ولهذه ثابت شبيكي وفجوة محظورة تتوسط بين GaAs و AlAs. وبسبب التوافق في التركيب الشبيكي فان المفرق المتباين من AlAs و GaAs وسبائكها يفقد الكثير من المراتب البينية وبذا يصبح ذا خواص مثالي تقريباً ويزيد من سهولة تصميم النبائط الفوتوفولطائية

ان اعلى كفاءة للخلايا الشمسية مسجلة لحد الآن على الاطلاق، هي كفاءة الخلايا المبينة على شبه موصل GaAs ويرجع سبب ذلك الى فجوتها المحظورة المثالية تقريباً وتقنيتها المتطورة. ولقد تم تسجيل كفاءة أكثر من 22% تحت ضوء الشمس AM1. وهذه اعلى من كفاءة السليكون في الظروف المماثلة والمقدرة 18%. ومع ذلك فهناك بعض المشاكل المرافقة لاستخدام شبه الموصل GaAs في عمل الخلية الشمسية وأولها محدودية مصادر عنصر Ga في الطبيعة حيث يجعلها دائماً مادة غالية الثمن (مرجع 10.11). ويوازن هذا بحقيقة ان خلايا GaAs تعتبر مثالية في المنظومات التي تعتمد على تركيز اشعة الشمس (الفصل 11) وكنتيجة لذلك فان كميات المادة اللازمة للحصول على قدرة معينة تكون قليلة كما ان كون الفجوة المحظورة في GaAs المباشرة يعني ان الضوء يمتص بسرعة عند سقوطه على المادة. لذلك فان مايطلب هنا هو طبقات رقيقة بسمك عدة مايكرونات فقط وهذا بدوره يقلل من الحاجة الى كميات كبيرة من المادة. والمشكلة الثانية هي طبيعة

عنصر الزرنيخ As السامة (toxic) وللأعتبارات البيئية لاستخدامات الخلايا الشمسية المبينة على مادة سامة بشكل واسع يجب ان تختبر بدقة (مرجع 10.12) .

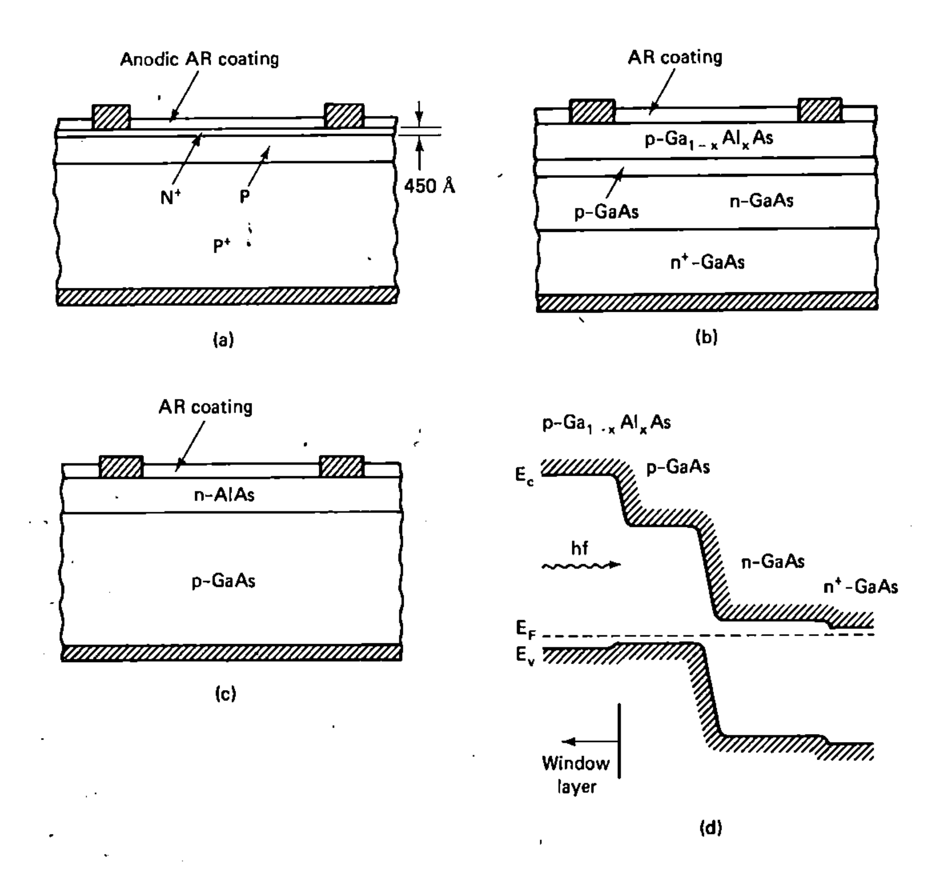
10.4.2 مفارق متجانسة (GaAs) GaAs Homojunctions

بسبب امتصاص الضوء مباشرة بعد سقوطه على شبه موصل ذي الفجوة المباشرة مثل GaAs فان المشاكل الناجمة عن السرعة العالية لاعادة الاتحاد السطحي للمفارق المتجانسة التقليدية اكبر بكثير من حالة السليكون . والكفاءات التي تم تحقيقها قبل عام 1978 لخلايا GaAs ذات المفرق المتجانس كانت معتدلة .

والتقنية المستخدمة لتقليل تأثيرات اعادة الاتحاد السطحية في حالة السليكون هي بجعل الطبقة السطحية من المفرق المتجانس رقيقة مقاربة مع معدل العمق التي تمتص عندها الفوتونات (فقرة 6.2.2) ويمكن استخدام التقنية نفسها في حالة GaAs الا ان السمك هنا يجب ان يكون اقل بمرتبة واحدة مما عليه في حالة السليكون. فلقد تم تسجيل كفاءات تزيد على 20% لخلية بتركيب N^+PP^+ والمبينة في الشكل (a) 10.5 والتي يكون فيها سمك N^+ 450 انكستروم فقط (مرجع 10.13) .

اما بالنسبة لصناعة الخلايا المبنية على GaAs فهناك فروق جوهرية في التصنيع تختلف عن تلك المستخدمة في صناعة الخلايا السليكونية التقليدية . فالطريقة الاكثر شيوعاً المستخدمة بدلا من تطعيم الطبقة السطحية هي الترسيب الكيمياوي لطبقات تحتوي على التركيز اللازم من الشوائب على الطبقة الارضية وهذه الطبقات تحافظ على نفس البنية البلورية للارضية وتتواصل معها وتدعى بالطبقات الفوقية (epitaxial layer) وتتكون هذه بواسطة تسخين الارضية بوجود المواد الكيميائية التي يراد ترسيبها من البخار السائل .

ان التركيب الموضح في الشكل (a) 10.5 يبدأ من ارضية عالية التطعيم P^+ وتنمى فوقها (expitaxially) طبقة P واطئة التطعيم سمكها عدة مايكرونات وتليها طبقة رقيقة عالية التطعيم N^+ وتساعد الأكسدة الانودية لجزء من الطبقة الاخيرة في تكوين طبقة طلاء غير عاكسة لابقاء سرعة اعادة الاتحاد لهذه الطبقة عند ادنى قيمة (مرجع 10.13) .



الشكل **10.5** الرسم التخطيطي لطرائق مختلفة لتصميم الخلايا الشمسية من نوع **GaAs**
(a) مفرق متجانس **CaAs**
(b) خلية ذات سطح متباين $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs$
(c) مفرق متباين **AlAs / GaAs**
(d) رسم حزمة الطاقة المناظرة لخلية ذات سطح متباين كما موضح في جزء (b) .

10.4.3 خلايا السطوح المتباينة $Ga_{1-x}Al_xAs/ GaAs$

$Ga_{1-x}Al_xAs/$ GaAs Heteroface

ان التقنية البديلة المستخدمة للتغلب على مساويء سرعة اعادة الاتحاد السطحية العالية لـ GaAs ذي الفجوة المحظورة المباشرة هي استخدام تركيب الوجه المتباين كما مبين في الشكل (b) 10.5 وبسبب التركيب المماثل في بنية GaAs وسبائكها AlAs معها يمكن بناء طبقة فوقية epitaxially من

على سطح خلية متجانسة المفرق . واذا كانت قيمة x حوالي 0.8 $Ga_{1-x}Al_xAs$ فإن الفجوة المحظورة لهذه الطبقة تكون عريضة . ويكون امتصاصها لضوء الشمس المار فيها قليلا . اي ان هذه المادة تعمل كطبقة شفافة تسمح بمرور الضوء خلالها الى التركيب التحتي كما مبين في الشكل (b) 10.5 . وبسبب التوافق الشبيكي الجيد مع الارضية يكون عدد المراتب عند السطح المبين لمفرق متباين الوجه قليلا . وتعمل هذه الطبقة الشفافة على كبح فعالية سطح GaAs التحتية .

وهذا التركيب للنبيطة ادى الى اعلى كفاءة على الاطلاق معروفة لحد الآن حيث تم الحصول على كفاءة 22% في ضوء الشمسي الأرضي (مرجع 10.14) اما خطوات التحضير فتبدأ من الأرضية GaAs من نوع -n تتبعها طبقة فوق بلورية $Ga_{1-x}Al_xAs$ من نوع -P وتنمى من الطور السائل liquid phase ويطعم الجزء الأعلى من الأرضية نوع -p وذلك بواسطة انتشار الشوائب من نوع -P . وللحصول على قطب معدني ذي مقاومة واطئة لطبقة $Ga_{1-x}Al_xAs$ فهناك بعض الصعوبات خاصة في حالة الخلايا المستخدمة في ضوء الشمس المركز . ويمكن التغلب على هذه المصاعب اما بواسطة ازالة هذه الطبقة في بعض المناطق وتوصيل المعدن الى الطبقة نوع -P التحتية (مرجع 10.15) او بواسطة عمل طبقة GaAs من النوع -P مركزة التطعيم للمنطقة التي يراد التوصيل المعدني عندها (مرجع 10.16) .

10.4.4 مفارق متباينة AlAs/GaAs Heterojunctions

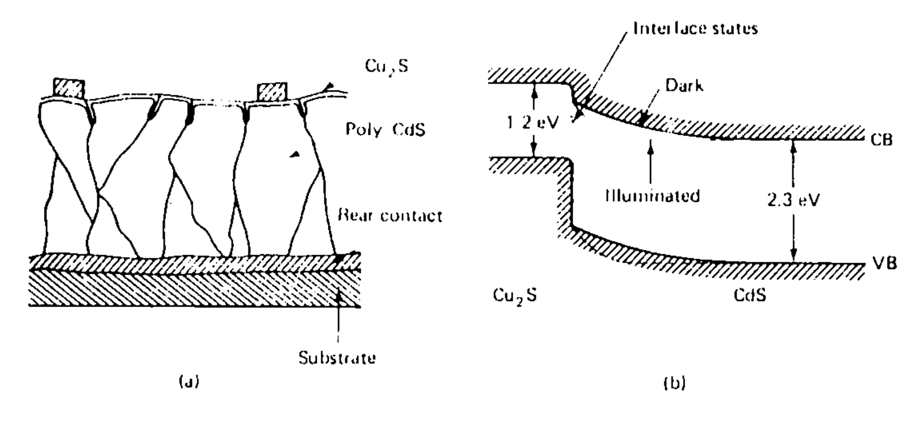
لقد تم الحصول على كفاءة اكثر من 18% من مفرق متباين من AlAs نوع -n و GaAs نوع -P (مرجع 10.17) كما مبين في الشكل 10.5(c) . والفجوة المحظورة غير المباشرة في AlAs تجعل هذه المادة نافذة امامية تسمح بمرور معظم الضوء ليمتص بصورة جيدة داخل متن الخلية الشمسية . وان عدم التوافق بين الفناء الالكتروني (electron affininity) لـ AlAs و GaAs يسبب ظهور نتوءات في حزمة التوصيل في المفرق المتباين (الفقرة 9.3) . ويجعل كثافة التطعيم في AlAs عالية يمكن التقليل من التأثيرات غير المرغوبة للنتوء الحاصل (المرجع 10.17) .

10.5 خلايا الشمسية من نوع Cu_2S/CdS SOLAR CELLS

10.5.1 تركيب الخلية Cell Structure

يرجع تاريخ خلايا Cds الى عام 1954 أي السنة نفسها التي ظهر عندها اول الخلايا السليكونية من النوع الطبقة الانتشارية ومن ثم اجريت عدة محاولات لانتاج خلية شمسية مبنية على هذه المادة . ومما تميز به هذه الخلايا أنها سهلة الصنع وتكون ارضية الخلية من مادة CdS متعدد البلورات ذي حبيبات صغيرة والتي يمكن تحضيرها بوسائل متعددة . ويبدو أن التبخير الفراغي وطريقة الرش من احسن الطرائق المستخدمة .

وتحضر خلايا CdS اعتيادياً بواسطة عملية كليفايت (Clevite process) ففي هذه العملية تبخر CdS في الفراغ على أرضية معدنية أو شريحة بلاستيكية أو زجاجية مغطاة بالمعدن . وترسب هذه المادة بسمك 20 مايكرون أو اقل ، ثم توضع في محلول كلوريد النحاس (بدرجة حرارة 80 الى 100 درجة مئوية) ولمدة 10 الى 30 ثانية . ففي هذه المرحلة يحل النحاس Cu محل Cd في طبقة سطحية رقيقة ذات سمك حوالي 1000 انكستروم الى 3000 انكستروم مكونة بذلك مفرق متباين Cu_2S/CdS . وثم يرسب قطب شبكي معدني ويبين الشكل 10.6 تركيب خلية كاملة من هذا النوع . ويمكن ان يمتد Cu_2S الى عدة مايكرونات خلال حدود الحبيبات ويبين الشكل 10.6(b) المخطط الحزمي للطاقة فمادة Cu_2S هي من نوع P- ولها فجوة محظورة 1.2 الكترون فولت بينما CdS تمثل نوع P- لها فجوة محظورة 2.3 الكترون فولت .



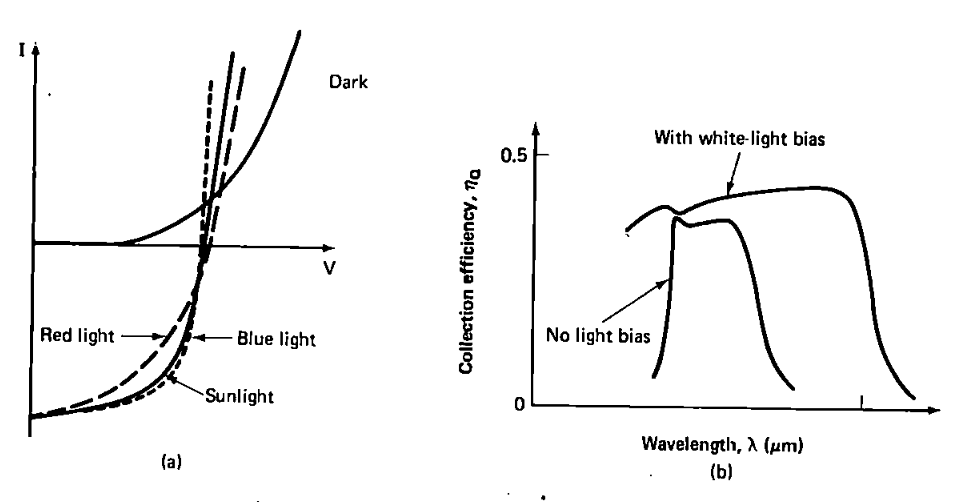
الشكل 10.6 الرسم التوضيحي لخلية أغشية رقيقة Cu_2S/Cds
(b) رسم حزمة الطاقة المناظرة في الظلام وتحت الاضاءة .

ولقد تم انتاج خلايا بهذه التقنية بكفاءات اكثر من 9% في المختبرات (مرجع 10.19) بينما في الصناعة التجريبية فقد تم الحصول على كفاءة 5% فقط .

10.5.2 خصائص التشغيل Operating Characteristics

من الغريب ان خلايا Cu_2S/CdS تتميز باداء حسن على الرغم من سهولة تصنيعها الا انها ليس من السهل تحديد العناصر التي تعطى الاداء الجيد لهذا النوع من الخلايا كما هو الحال في خلايا si و GaAs . ويمكن وصف عملها فقط بأدخال بعض المفاهيم الأضافية الى تلك الموضوفة للخلايا التقليدية .

وتتضمن استجابة خلايا Cu_2S/Cds عدة تغيرات لاخطية وإن خيرتوضيح لهذه الحقيقة فهو تقاطع خصائص التيار والفولتية لهذا الخلايا في حالة الاضاءة مع خصائصها في الظلام كما موضح في الشكل 10.7(a) . إضافة الى ذلك فإن فولتية الدائرة المفتوحة وعامل الملء لهذه الخلايا يعتمدان على المحتوى الطيفي للضوء الساقط وليس على كثافة التيار المتولد ضوئياً فقط . وهذا موضح في الشكل 10.7(a) . كما أن سعة الخلية (cell capacitance) تزداد بدرجة كبيرة (من 10 الى 100 مرة) عند اضاءة الخلية . وتعتمد الاستجابة الطيفية للخلايا والمبينة في الشكل 10.7(b) بدرجة كبيرة على شدة (وكذلك على التركيب الطيفي) الضوء الساقط . ومع وجود كل التاثيرات المذكورة اعلاه فان درجة التغيير تتغير بشكل كبير مع إختلاف ظروف التصنيع .



الشكل 10.7 اللاخطيات الملازمة لعمل خلايا Cu_2S/CdS
(a) تقاطع منحنيات الظلامي والضوئي للخلية واعتمادها على المحتوي الطبقي للضوء الساقط .
(b) التحسن في الاستجابة الطيفية باستخدام الانحياز الضوئي (مرجع IEEE 1978, 10.2)

ويتبين من قياس السعة ان عرض منطقة الاستنزاف تضيق عند إضاءة الخلية كما موضح في الشكل 10.6(b) والتفسير المحتمل لهذه الظاهرة (مرجع 10.20) هو نشوء مراتب الشرك في منطقة الاستنزاف بواسطة شوائب النحاس التي تنتشر في هذه المنطقة خلال عملية تكوين طبقة Cu_2S أو بعد المعالجة الحرارية اللاحقة. ففي حالة الأضاءة تقتنص مراتب الشرك الفجوات المتولدة بتأثير الضوء وتعمل على زيادة الشحنة الموجبة الناتجة من الشوائب الواهبة في منطقة نوع n- وهذا بدوره يؤدي الى تناقص عرض منطقة الاستنزاف كما تم وصفه رياضياً في المعادلة (4.4) . وهذا يزيد ايضاً من شدة المجال الكهربائي في هذه المنطقة كما موضح ايضاً في المعادلة (4.4) .

وهذا يساعدنا على تفسير الاستجابة الطيفية للخلايا وغالبا يكون هناك عدد كبير من المراتب المسموحة في الفجوة المحظورة وعند السطح البيني لمفرق Cu_2S/CdS بسبب عدم التوافق في الشبيكة البلورية بين المادتين كما مبين في الشكل (b) 10.6 . وتعمل هذه المراتب كمراكز اعادة اتحاد فعالة غير انه من الممكن ان نوضح بان فعالية هذه المراكز تقل عند وجود مجال كهربائي كبير . وفي هذه الحالة تمر الحاملات عبر هذه المراكز وبسرعة عالية جداً بحيث تقل احتمالية اعادة الاتحاد في هذه المراكز . ويتولد معظم التيار الناتج في الخلية وفي طبقة Cu_2S العليا ذات الفجوة المحظورة 1.2 الكترون فولت والنسبة القليلة الباقية تتولد من الطبقة السفلى CdS ذات الفجوة المحظورة الاوسع (2.3 الكترون فولت) (مرجع 10.21) . وبما ان المجال الكهربائي عند السطح البيني يكون صغيراً نسبياً بدون الانحياز الضوئي فان هذا يعني ان احتمالية اعادة اتحاد الحاملات تكون جيدة وتكون الاستجابة الطيفية للخلية ضعيفة كما مبين في الشكل (b) 10.7 . اما بوجود الانحياز الضوئي يزداد المجال الكهربائي وتقل احتمالية اعادة الاتحاد وتتحسن الاستجابة الطيفية .

ان حساسية خصائص الخلايا تجاه الاطوال الموجية المختلفة ترجع الى القابيلة النسبية للاطوال الموجية المختلفة في خلق مراتب القنص عند السطح البيني لتقتنص الفجوات . وفي الاحوال كلها فان التحليل السابق واحد من عدة تحليلات لخصائص هذه الخلايا وان كان هذا التحليل صحيحاً الى درجة مقبولة فهنالك بعض اليات اخرى يجب ان تؤخذ بنظر الاعتبار لتفسير جميع الخصائص الملموسة تجريبياً .

10.5.3 مزايا ومساوىء خلايا Cu_2S / CdS
Advantages and Disadvantages of Cu_2S/ CdS Cells

ان اول مزايا خلايا Cu_2S / CdS هو سهولة صنعها على ارضيات متنوعة اذ يمكن اختيار المناسب منها للتصنيع الذاتي ذي الانتاجية العالية ومن الممكن انتاج خلايا رخيصة الثمن .

ان اهم مساوىء هذه الخلايا هي كفاءتها الواطئة وضعف استقراريتها خلاف لما تمتلكه الخلايا السليكونية . اما من ناحية الكفاءة الواطئة فان تكاليف الاجزاء الاخرى للمنظومة تصبح اكثر اهمية وذلك لان مساحة الخلايا المطلوبة لنتاج معين تزداد . وعند موازنة تكاليف المنظومة فان التكاليف الاخرى مثل تكاليف تهيئة الموقع وهيكل التركيب وشبكة الاسلاك لمثل هذه المنظومة الكبيرة تكون غالية جداً وان اهملنا تكاليف الخلايا . ولذا قد يكون من الافضل استخدام خلايا بكفاءة عالية وبتكاليف اكثر لتقلا النفقات الجانبية الاخرى في المنظومة .

وكقاعدة عامة قد نجد ان اوطأ كفاءة ممكن القبول بها للوح الشمسي في بناء منظومة ذات قدرة عالية لتكون مقبولة اقتصادياً هي 10% .

ويمكن قول الشيء نفسه بالنسبة لتكاليف تغليف هذه الخلايا . وبما ان هذه الخلايا اقل استقراراً من الانواع الاخرى من الخلايا التقليدية فانها تحتاج الى عناية اكثر في التغليف اذا اردنا لها ان تدوم كبقية الخلايا وبذلك تكون تكاليف التغليف اعلى حتى يكون عمرها مقارباً لعمر الخلايا التقليدية .

ولقد لوحظت ظاهرة التردي في خلايا Cds (مرجع (10.22)) .
(1) عند الرطوبة العالية (2) عند درجات الحرارة العالية $(T > 60°C)$ في الهواء . (3) وعند اضاءتها عند درجات الحرارة العالية و (4) عندما تزيد فولتية الحمل اكثر عن 0.33 فولت .

والرطوبة الممتصة في الخلية تؤدي الى نشوء مراتب قبض اضافية تعمل على تقليل تيار الدائرة القصيرة . وهذه عملية عكسية حيث من الممكن ارجاع التيار الى قيمته الاصلية بتلدين حراري مناسب . اما اذا تم تسخين النبيطة الى درجات حرارية اكثر من 60 درجة مئوية في الهواء فيحدث تغيير دائم غير عكسي للتيار ويعود سبب ذلك الى تحويل Cu_2S الى سبيكة من CuO و Cu_2S وذلك لتفاعله مع الاوكسجين والرطوبة حتى في غياب الهواء فان الاضاءة عند هذه الحرارة تحط من الكفاءة . والضوء قد يساعد على احداث تغيير الطور phase في

طبقة Cu_2S التي يتحول بعض منها الى Cu_xS حيث $x < 2$. وهذا التغير في التركيب الكيمياوي الذي يظهر يقلل من الكفاءة بشكل ملحوظ . كما ان تشغيل الخلايا عند فولتية تزيد على 0.33 فولت يؤدي الى تحويل Cu_2S الى CuS و Cu تحت تاثير الضوء . وبما ان عنصر Cu جيد التوصيل فانه يكون شعيرات موصلة عبر المفرق .

ومن الممكن معالجة المشاكل السابقة بواسطة اجراء بعض التغييرات الثانوية في صناعة الخلية وبالتغليف المتقن الذي يضمن منع المؤثرات الكيميائية الخارجية . كما ان الاستخدامات الواسعة لهذه الخلايا في المستقبل تعاني من محدودية الكميات الاحتياطية لمادة Cds والطبيعة السمية لـ Cd .

10-6 الخلاصة SUMMARY

هناك عدد كبير من المواد ظهرت قابليتها لتكون بديلة لمادة السليكون احادي البلورة التي تشكل حاليا اعادة المادة الاساسية في صناعة الخلية الشمسية . وفي هذا الفصل تناولنا بعض هذه المواد التي تتميز بتطوير تقنية التعامل معها .

فان مادة GaAs هي شبه موصل ذو فجوة محظورة مثالية تقريباً لعملية تحويل الطاقة الفوتوفولطائية . اذ توجد تقنية متقدمة ومتطورة لانتاج هذه المادة . واكثر الخلايا كفاءة لحد الان هي المصنوعة من هذه المادة . فالخلايا من نوع المفرق المتجانس والمتباين وخلايا ذات السطوح المتباينة كلها تظهر كفاءة عالية ويبدو انها قد تغلبت على مشكلة سرعة اعادة الاتحاد السطحية المؤثرة في مادة ذات فجوة محظورة مباشرة . واسوأ ما في هذه المادة هو سعرها الغالي .

اما خلايا Cu_2S / Cds فتمتاز بطريقة صنعها السهلة جداً على شبه موصل كبريتيد الكادميوم المتعدد البلورات . وعلى الرغم من ان تقنية تحضيرها تكون رخيصة الكلفة ، الا ان كفاءتها واطئة التي لاتصل الى 10% ، وكلفة التغليف المعقدة التي تحتاجها لحمايتها من الظروف الجوية تحول دون استعمالها الواسع .

اما السليكون المتعدد البلورات فمن مساوئه انه يحتاج الى ان يكون ذا حبيبات كبيرة الحجم وهذا يتسبب في رفع كلفة التحضير ومع ذلك فقد لوحظ ان مزايا الانتاج للاغشية البلورية ذات الحبيبة الكبيرة تفوق السليكون احادي البلوري حيث ادت الى انتاج خلايا تجارية مبنية على هذه التقنية . اما احسن الخلايا المرجوة في المستقبل فهي المبنية على اغشية السليكون غير البلوري . وقد حدثت تطورات في هذه التقنية على المستويين العلمي والتجاري بعد ان تم اكتشاف مزاياها المرغوبة .

تمارين

10.1 اذا تم ترسيب طبقة من سليكون متعدد البلورات على ارضية معدنية . وان الحبيبات في هذه الطبقة لها تركيب عمودي كما في الشكل 10.1(b) وبابعاد عرضية مساوية لسمك الطبقة . وتم عمل مفرق p–n قريباً من سطح هذه الطبقة . باهمال افضلية الانتشار للشوائب في حدود الحبيبات واذا اعتبرنا ان حدود الحبيبات تعمل كحوض تصريف كبير لحاملات الاقلية وان سرعة اعادة الاتحاد ، عند السطح البيني للمعدن ـ شبه الموصل عند القطب الخلفي للخلية ، كبيرة جداً وبتقريب حجم الحبيبة الى مكعب ، احسب اعلى احتمالية اسهام الحاملات الاقلية المتولدة في مركز حجم محدد بحبيبة في تيار الدائرة القصيرة للخلية (ملاحظة : تحت ظروف الدائرة القصيرة يعتبر مفرق p–n منطقة جاذبة جداً لحاملات الاقلية ويعمل كحوض تصريف اخر للحاملات . وتكون احتمالية التجميع اكبر مايمكن عندما يكون طول مسار الانتشار لحاملات اكبر بكثير من ابعاد الحبيبة . وهذه تناظر الحالة التي لايحدث فيها اعادة اتحاد ضمن حجم الحبيبة) .

10.2 ارسم شكلا تخطيطيا لمعدل توليد زوج الكترون فجوة كدالة للعمق تحت سطح الخلية للخلايا الشمسية ذات السطح المتباين المبين في الشكل 10.5(b) .

10.3 تنتج تقنية معينة لوحا شمسيا بكفاءة 10% وبكلفة دولار واحد للقدرة الذروية (peak-power) تحت شمس ساطعة (١ كيلو واط/ م٢) . اذا كانت كلفة موازنة المنظومة في تطبيق معين تعتمد على مساحة المصفوفات المنتشرة بمعدل 80 دولار/ م٢ .
وبفرض ان تبقى الكلف الاخرى متماثلة في كل حالة ، باي سعر يجب ان يباع لوح شمسي منتج بتقنية ثابتة له كفاءة 5% عندما تكون الكلفة الكلية للمنظومة متشابهة في التقنيتين ؟

REFERENCES المراجع

[10.1] A. L. FAHRENBRUCK, II-VI Compounds in Solar Energy Conversion," *Journal of Crystal Growth 39* (1977), 73-91; A. M. Barnett and A. Rothwarf, "Thin-Film Solar Cells: A Unified Analysis of Their Potential," *IEEE Transactions on Electron Devices ED-27* (1980), 615-630; S. Wagner and P. M. Bridenbaugh, "Multicomponent Tetrahedral Compounds for Solar Cells," *Journal of Crystal Growth 39* (1977), 151-159; M. Schoijet, "Possibilities of New Materials for Solar Photovoltaic Cells," *Solar Energy Materials 1* (1979), 43-57.

[10.2] J. G. FOSSUM AND F. A. LINDHOLM, "Theory of Grain-Boundary Intragrain Recombination Currents in Polysilicon *p-n* Junction Solar Cells," *IEEE Transactions on Electron Devices ED-27* (1980), 692-700.

[10.3] H. C. CARD AND E. S. YANG, "Electronic Processes at Grain Boundaries in Polycrystalline Semiconductors under Optical Illumination," *IEEE Transactions on Electron Devices ED-24* (1977), 397-402.

[10.4] H. FISCHER AND W. PSCHUNDER, "Low Cost Solar Cells Based on Large Area Unconventional Silicon," *Conference Record, 12th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Baton Rouge, 1976, pp. 86-92.*

[10.5] J. LINDMAYER AND Z. C. PUTNEY, "Semicrystalline versus Single Crystal Silicon," *Conference Record, 14th Photovoltaic Specialists Conference, San Diego*, 1980, pp. 208-213.

[10.6] W. E. SPEAR AND P. G. LECOMBER, *Solid State Communications 17* (1975), 1193.

[10.7] D. E. CARLSON et al., "Solar Cells Using Schottky Barriers on Amorphous Silicon," *Conference Record, 12th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Baton Rouge*, 1976, pp. 893-895.

[10.8] D. E. CARLSON, "An Overview of Amorphous Silicon Solar-Cell Development, *Conference Record, 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego*, 1980, pp. 291-297.

[10.9] J. J. HANAK, "Monolithic Solar Cell Panel of Amorphous Silicon," *Solar Energy 23* (1979), 145-147; Y. Kuwano et al., "A Horizontal Cascade Type Amorphous Si Photovoltaic Module," *Conference Record, 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego*, 1980, pp. 1408-1409.

[10.10] A. MADAN, S. R. OVSHINSKY, AND W. CZUBATYJ, "Some Electrical and Optical Properties of a-Si:F:H Alloys," *Journal of Electronic Materials 9* (1980), 385-409.

[10.11] H. J. HOVEL, *Solar Cells*, Vol. 11, Semiconductor and Semimetal Series (New York: Academic Press, 1975), pp. 217-222.

[10.12] T. L. NEFF, "Comparative Social Costs and Photovoltaic Prospects," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D.C.*, 1978, pp. 1001-1003.

[10.13] J. C. C. FAN AND C. O. BOZLER, "High-Efficiency GaAs Shallow-Homojunction Solar Cells," *Conference Record, 12th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D.C.*, 1978, pp. 953-955.

[10.14] J. M. WOODALL AND H. J. HOVEL, *Applied Physics Letters 30* (1977), 492.

[10.15] R. SAHAI et al., "High Efficiency AlGaAs/GaAs Concentrator Solar Cell Development," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D.C.*, 1978, pp. 946-952.

[10.16] H. A. VANDER PLAS et al., "Performance of AlGaAs/GaAs Terrestrial Concentrator Solar Cells," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D.C.*, 1978, pp. 934-940.

[10.17] W. D. JOHNSTON, JR. AND W. M. CALLAHAN, "Vapor-Phase-Epitaxial Growth, Processing and Performance of AlAs-GaAs Heterojunction Solar Cells," *Conference Record, 12th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Baton Rouge*, 1976, pp. 934-938.

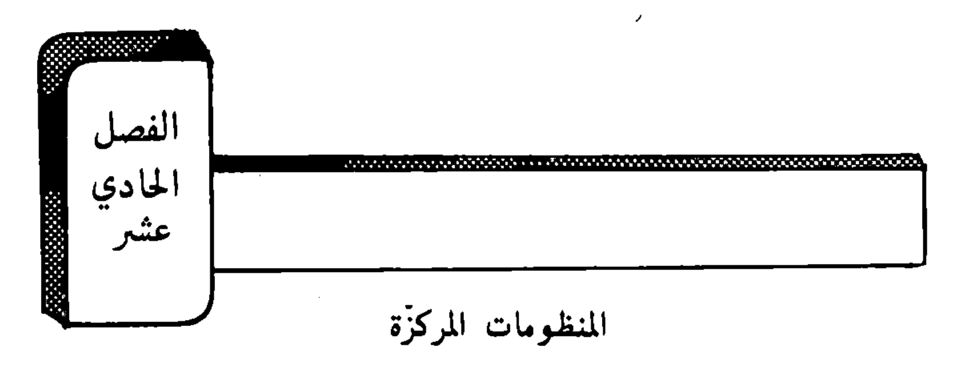
[10.18] F. A. SHIRLAND, "The History, Design, Fabrication and Performance of CdS Thin Film Solar Cells," *Advanced Energy Conversion 6* (1966), 201-222.

[10.19] J. A. BRAGAGNOLO et al., "The Design and Fabrication of Thin-Film CdS/Cu_2S Cells of 9.15 Percent Conversion Efficiency," *IEEE Transactions on Electron Devices ED-27* (1980), 645-651.

[10.20] A. ROTHWARF, J. PHILLIPS, AND N. CONVERS WYETH, "Junction Field and Recombination Phenomena in CdS/Cu_2S Solar Cell," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D.C.*, 1978, pp. 399-405.

[10.21] J. A. BRAGAGNOLO, "Photon Loss Analysis of Thin Film CdS/Cu_2S Photovoltaic Devices," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D.C.*, 1978, pp. 412-416.

[10.22] Reference 10.11, pp. 195-198.



المنظومات المركّزة

CONCENTRATING SYSTEMS

11.1 المقدمة INTRODUCTION

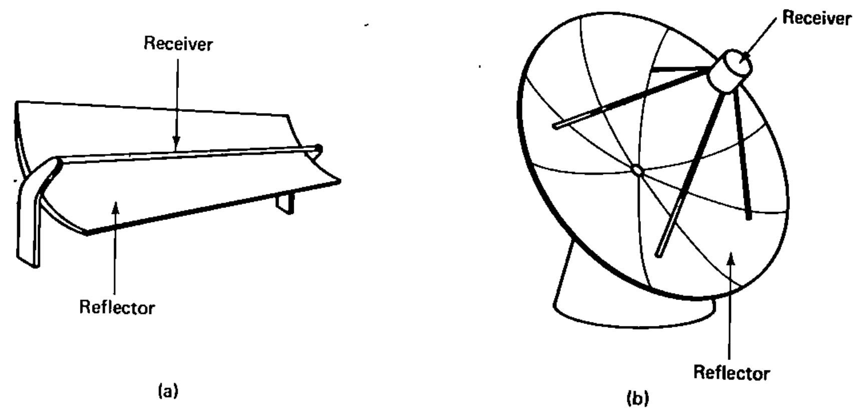
من الوسائل المحتملة مستقبلا ان يخفض كلفة القدرة الفوتوفولطائية مع التقنيات المستخدمة حالياً لصناعة الخلايا الشمسية ، هي تقليل مساحة الخلايا اللازمة لتوليد القدرة المطلوبة . وتحول هذه الوسيلة تكاليف تقنية صناعة الخلية الى تكاليف العناصر المستخدمة في منظومة التركيز ومتابعة مسار الشمس .

وبصورة عامة كلما كانت نسبة التركيز اعلى قل مدى زوايا الاشعاع المستقبلة وعندما تصل نسبة التركيز حدود 10 تقوم المنظومة بالاستفادة من ضوء الشمس المباشر فقط وبذلك تحتاج المنظومة الى متابعة مسار حركة الشمس . وتحتاج النسبة العالية من التركيز الى تتبع دقيق لمسار الشمس . والمدى المحدد من الزوايا للاشعاع الواصل من الشمس الى الارض بسبب حجمها المعين، يحدد اعلى احتمالية لنسبة التركيز ويكون بحدود 45,000 .

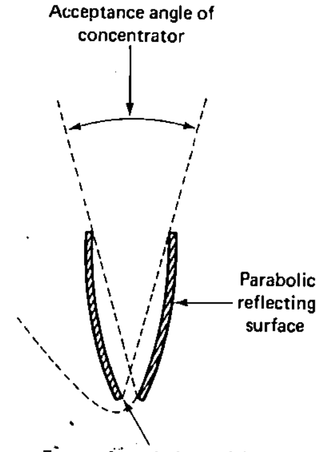
ان عملية تركيز ضوء الشمس على الخلية تسبب ايضاً ارتفاع في درجة حرارتها مما تؤدي الى تقليل كفاءتها . وعندما تكون نسبة التركيز اعلى من 50 فتحتاج الخلية الى تبريد غير فعال (passive cooling)(مثل استخدام الزعانف .. وغيرها) . اما التركيز بنسب اعلى فيحتاج الى تبريد فعّال (active cooling) . ويمكن استخدام منظومات القدرة الكلية للاستفادة من القدرة الفوتوفولطائية والقدرة الحرارية المستخرجة من عملية التبريد .

11.2 المركزات المثالية IDEAL CONCENTRATORS

تعرف نسبة التركيز الهندسي (C) بأنها النسبة بين مساحة فتحة المنظومة والمساحة الفعالة من سطح الخلية . وكما ذكرنا سابقاً تعتمد نسبة التركيز على مدى معين من الزوايا θ_m التي يمكن ان تستقبلها المنظومة . وبالافادة من قوانين الديناميكية الحرارية يمكن اشتقاق علاقات رياضية بين اعلى نسبة ممكنة للتركيز وزاوية الاستقبال . وللمنظومات التي تركز الضوء الواصل اليها بزوايا مختلفة ضمن الزوايا المسموحة ، وبنسبة متساوية ، يمكن التعبير عن اعلى نسبة التركيز بالمعادلة التالية (مرجع 11.1) .



الشكل 11.1 (a) المركز الخطي أو ذو البعدين (b) المركز النقطي أو ذو ثلاث ابعاد .



الشكل 11.2 رسم توضيحي للمركز ذي القطع الناقص المركب (CPC) .

$$C_{m(2D)} = \frac{1}{\sin(\theta_m/2)} \quad (11.1)$$

وتمثل هذه المعادلة حالة مركز خطي أو ذو بعدين كما مبين في الشكل (a) 11.1 اما في حالة مركز بثلاثة ابعاد أو منظومة التركيز النقطي فتعطي بالمعادلة التالية

$$C_{m(3D)} = \frac{1}{\sin^2(\theta_m/2)} \quad (11.2)$$

وكما مبين في الشكل (b) 11.1 . فأن مدى زوايا الاشعة في ضوء الشمس المباشر تحدد بقرص الشمس وهو تقريباً $\frac{1}{2}^\circ$ (9.4 mrad) . ويعطي هذا النوع من المنظومة اقصى احتمالية ممكنة للتركيز وتساوي 45,000 (في حالة منظومة التركيز النقطي)

وان الكفاءة المثالية ، للمركزات التقليدية مثل القطع الناقص (Parabola) المركز والعدسات ، تقل عن حدود المعادلتين 11.1 و 11.2 بمقدار 2 الى 4 (مرجع 11.2) . وقد لوحظ اول مركز تقترب كفاءته من حدود هاتين المعادلتين هو المركز ذو القطع الناقص المركب (CPC) المبين في الشكل 11.2 وهذا المركز يحتوي على سطحين عاكسين على شكل قطع ناقص ثم رصفها (aligned) بحيث يقع البعد البؤري لهما في المواقع المبينة في الشكل .

11.3 المركزات الثابتة والمضبطة دورياً

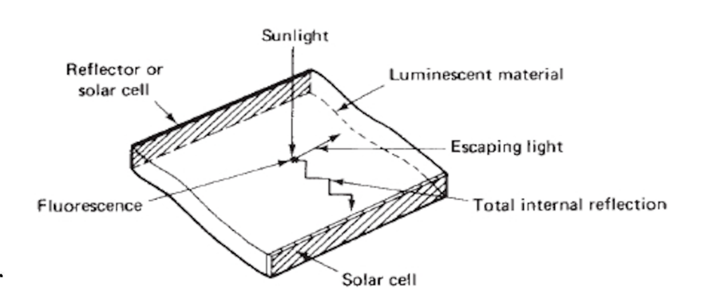
STATIONARY AND PERIODICALLY ADJUSTED CONCENTRATORS

بالنسبة للمركزات الثابتة و المركزات التي تضبط اتجاهها يومياً أو فصلياً يفضل ان تكون لها اكبر زاوية ممكنة لاستقبال الضوء ليساعدها على الحصول على التركيز العالي . وكمثال على ذلك نأخذ مركزاً حوضياً (trough concentrator) بحيث يقع محوره الطولي بأتجاه شرق ــ غرب . وبما انه تحدث تغيرات ملحوظة في اتجاه اشعة الشمس بسبب تغيير زاوية ارتفاع الشمس ، حيث يكون تغير زاوية ارتفاع الشمس ضمن $\pm 36^\circ$ من مستوى مسارها عند الاعتدالين وبمعدل 7 ساعات على الاقل كل يوم من السنة . ولذلك فالتصميم المثالي للمركز الحوضي يجب ان

يركز الضوء 7 ساعات في كل يوم على الاقل عندما تكون زاوية استقبال المنظومة 72° وعليه فان اعلى نسبة للتركيز التي يمكن الحصول عليها هي $1/\sin(72°/2)$ اي بحدود 1.7 . ويمكن الحصول على نسب اعلى اما باستخدام المنظومة لفترات اقل أو بضبطها فصلياً .

قامت مختبرات اركون ناشنال ، في عام 1976 ، بصناعة الواح فوتوفولطائية صغيرة للعمل مع مركزات CPC حيث استخدمت مجموعة من هذه الالواح مع عاكسات ذات قطع ناقص واستخدم مع مجموعة اخرى انعكاس داخلي كلي ضمن جسم صلب بشكل CPC (مرجع 11.3) . وتحتاج مثل هذه المنظومات ضبط موسمي لتعطي نسب تركيز من 7 الى 9 .

اوضحت المناقشة السابقة ان التركيز الناتج من المركزات الثابتة يكون واطئاً نسبياً (بصورة عامة اقل من 3) بينما ترفع المركزات التي تضبط فصلياً هذه النسبة الى حوالي 12 . وقد يكون التركيز المحصل من مركز ثابت حدي بحيث يغني عن الدخول في تعقيدات اضافية لعملية المتابعة . ومع ذلك فهناك ميزة مرغوبة وخاصة في المركزات غير المتناظرة وهي رفع كفاءة المنظومة الشمسية في الشتاء بالنسبة الى كفاءتها في الصيف (مرجع 11.4) . اما بالنسبة للمنظومات المستقلة (فصل 13) فان عملية التركيز لاتساعد على تصغير مساحة الخلايا اللازمة فحسب بل تساعد ايضاً على التقليل من الطاقة المخزونة ومن ثم التقليل من شدة التفريغ الدوري للطاقة المخزونة .



الشكل 11.3 المركز ذو مادة اضائية (**Luminescent concentrator**) . والضوء الممتص يعاد انباعثه بواسطة المادة الاضائية وتنحصر نسبة كبيرة من هذا الضوء ضمن الشريحة بواسطة عملية الانعكاس الداخلي واخيراً يصل هذا الضوء المنحصر الى الخلية الشمسية .

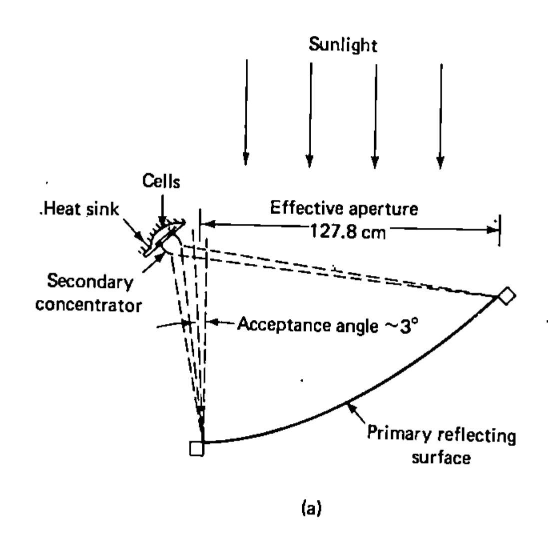
ومن فوائد منظومات التركيز الواطيء (أقل من 5 مرات) نسبياً هو احتمالية الافادة من الخلايا المصنوعة بالطرق التقليدية مع هذه المنظومات ووضع برنامج اقتصادي ذي العلاقة بهذا المجال. والمنظومات ذات التركيز العالي تحتاج الى تغييرات جوهرية في تصميم الخلايا.

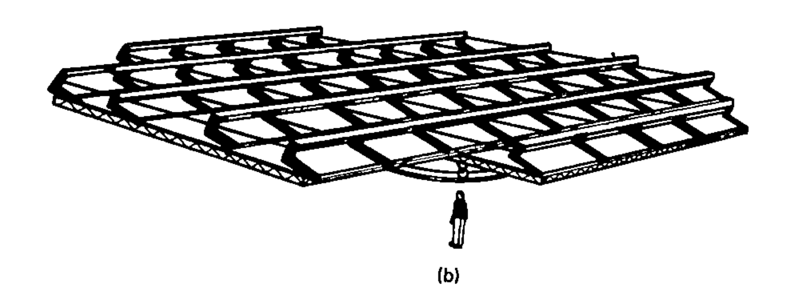
والطريقة المبتكرة لتجنب استخدام المركزات المعقبة هي استخدام المركز الضيائي (luminescent concentrator) (مرجع 11.5) ويتم ذلك بتطعيم شريحة من الزجاج أو اللدائن بمادة متلألئة. وتثبت هذه الشريحة على طول احدى حافات قاعدة الخلية الضوئية وتبقى الحافات الثلاث الاخرى لتعمل كعاكسات كما موضح في الشكل 11.3. وتمتص المادة الشائبة الضوء الساقط ثم تبعثه ثانية بواسطة المادة المضيئة في مدى طول موجي ضيق. وينحصر الجزء الاكبر من الضوء المنبعث داخل القاعدة اما بواسطة الانعكاس الكلي الداخلي أو بواسطة الانعكاس من الحافات العاكسة الى ان يسقط على الخلية الشمسية المثبتة. والتركيز الناتج من هذه المنظومة لايتحدد بواسطة العوامل المذكورة سابقاً فهذه المنظومة تستقبل الضوء في جميع زوايا السقوط. وتعتمد اقصى نسبة تركيز في هذه المنظومة على بعض الاعتبارات العملية كامتصاص الضوء المنبعث من الشريحة.

11.4 المركزات المعقبة لمسار الشمس
TRACKING CONCENTRATORS

المسار الرئيس في مجال المركزات الفوتوفولطائية يكون باتجاه المنظومات المركزة بنسبة اكبر من 20 وذلك بتعقب مسار الشمس وقد تم اكتشاف طرائق مختلفة لتصميم مثل هذه المنظومات وتم استخدام هذه الطرائق لنصب وحدتي تركيز بـ 10 كيلو واط تقريباً في مختبرات سانديا (Sandia Lab) خلال عامي 1978 و 1979. المنظومة الاولى موضحة في الشكل (a) 11.4 اذ يستخدم في هذه المنظومة حوض قطع الناقص لتركيز ضوء الشمس على مركز ثانوي ومن ثم الخلية (مرجع 11.6). وبصورة عامة تكون نسبة التركيز الهندسي لهذه المنظومة حوالي 25. وهذا الترتيب يخفف من الدقة المطلوبة للمركز الاولي، رغم ان الضوء يعاني انعكاسين فما يقلل الضوء الواصل الى الخلية والذي يقدر بـ 78% كحد اعلى من الضوء الساقط. ومع ملاحظة وجوب حوض لتصريف الحرارة للحفاظ على درجة حرارة الخلايا منخفضة. ويبين الشكل 4.10(b) مصفوفة شمسية بنتاج 10 كيلو ـ واط تمت نصبها على مسار دائري معقب لزاوية السمت.

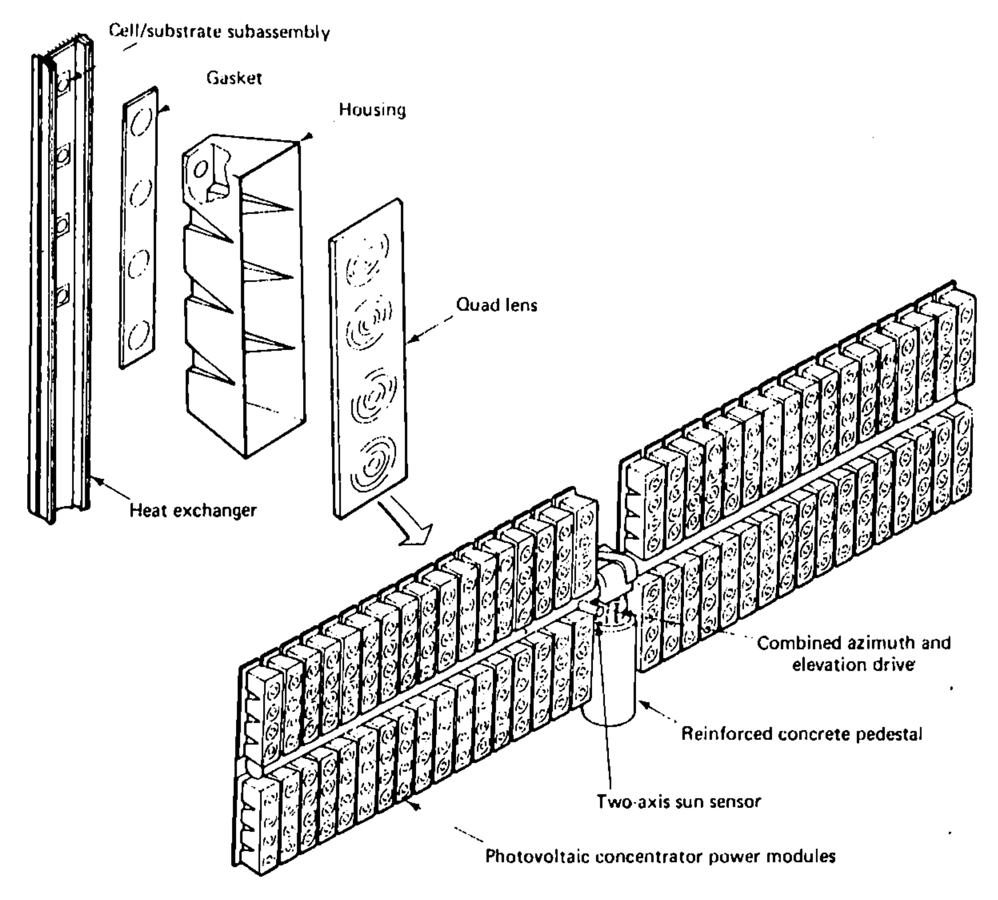
وهناك طريقة اخرى بديلة كما موضح في الشكل 11.5 تعتمد على ظاهرة الانكسار . كما ان عدسات فرينل (Fresnel lens) لها فوائد عديدة في مثل هذه التطبيقات ، اذ ان هذه العدسات لاتركز ضوء الشمس بل انها ايضاً توفر اطاراً محكماً للخلية . ويستخدم في هذه المنظومة عدسات مربعة لتركيز الضوء على الخلايا المثبتة على جسم لتصريف الحرارة . وفي هذا التصميم ، يمكن جعل مساحة الجسم الخافض للحرارة بسعة قيمة المنظومة للحفاظ على درجة حرارة الخلية ضمن مدى مقبول حتى مع المركزات التي تصل نسبة تركيزها الى 40 .





الشكل 11.4 منظومة تركيز فوتوفولطائي ذات 10 كيلو ـ واط مستخدمة مركزاً ذا قطع ناقص حوضي
(a) عناصر التركيز وحاوية الخلية
(b) وضع المنظومة على معقب دائري

واستخدمت هذه الطريقة مع مصوفة شمسية ذات نتاج 2.2 كيلو ــ واط (مرجع 11.7) . وتم نصب منظومة فوتوفولطائية ذات نتاج 350-kW_p على هذه الطريقة في المملكة العربية السعودية خلال عام 1980 و 1981 . ففي ذلك الوقت كانت هذه المنظومة اكبر منظومة فوتوفولطائية في العالم .



الشكل 11.5. منظومة تركيز ذات 2.2 كيلو واط مبنية على عدسات فرنيل . وان العدسات لاتركز الضوء فحسب بل تساعد على حماية الخلايا . وفي هذا التصميم مساحة حوض تصريف الحرارة مقاربة لفتحة المنظومة (مرجع 11.7) .

11.5 تصميم الخلية للمركز

CONCENTRATOR CELL DESIGN

تزداد الكفاءة المثالية للخلية مع زيادة نسبة تركيز الضوء ويعزى دلك الى زيادة تيار الدائرة القصيرة خطياً مع شدة الضوء الساقط وزيادة فولتية الدائرة المفتوحة لوغارتمياً ويزداد عامل الملء مع زيادة فولتية الدائرة المفتوحة لوغارتمياً . ومن الصعوبات الرئيسية التي تحول دون تحقيق هذه الزيادة من الكفاءة هي زيادة فقد القدرة في المقاومة المتوالية عند كثافة التيار العالية . وبما ان كفاءة الخلية هي التي تحدد مساحة عناصر التركيز اللازمة لانتاج قدرة معينة ، لذا فمن المهم احراز اكبر كفاءة للخلايا المستخدمة .

ومن الممكن ان تأخذ بنظر الاعتبار الاقتراحات الاتية لتقليل مقاومة الخلية الشمسية : (1) استخدام ارضية ذات مقاومة واطئة وبمجال سطح خلفي ليكون الفقد بسبب مقاومية متن المادة ومعدن التوصيل قليلا : (2) التقليل من المقاومية الصفيحية لطبقة الانتشار السطحي الى ادنى قيمة ممكنة . (3) استخدام اصابع معدنية رفيعة وجيدة التوصيل للقطب العلوي لتقليل المقاومة الناتجة من جريان التيار العرضي . (4) استخدام طبقات سميكة من معدن التوصيل لتقليل فقد المقاومية في الاصابع والأعمدة المعدنية الوسطية .

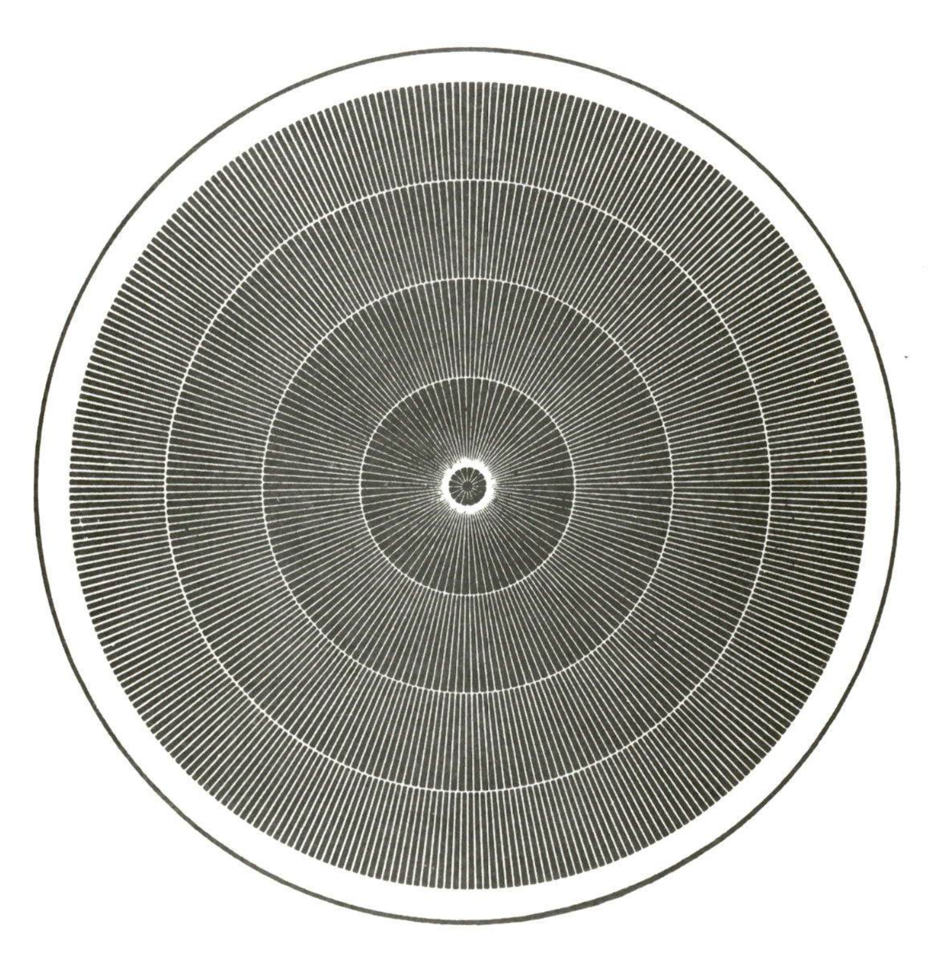
تؤخذ هذه الخطوات بنظر الاعتبار عند صناعة الخلايا الخاصة بالتركيز في الوقت الحاضر ، حيث تستخدم ارضيات بمقاومية اوطأ من التي تستخدم عادة في الخلايا الشمسية الاعتيادية[1] . ويحافظ على مقاومية طبقة الانتشار السطحي لتكون واطئة بشكل مقبول . مع ان التقليل اكثر من الحد المطلوب يؤدي الى ظهور تأثيرات تقلل من اداء الخلية كما تم شرح ذلك في الفصل السابع . وكل تقنية لتحديد القطب العلوي تضع حد ادنى لعرض الاصابع المعدنية ويعتمد هذا الحد ايضاً على سمك المعدن المستخدم . في صناعة القطب . وكقاعدة عامة للابعاد المستخدمة في مثل هذه الاصابع المعدنية يكون سمك المعدن بحدود نصف عرض الاصبع . اما من الناحية العملية فترسب معادن القطب بواسطة عملية التبخير في الفراغ ويحدد النمط المطلوب باستخدام تقنية النحت الضوئي

---

(١) بسبب تاثيرات الحقن العالي للحاملات ، فان مقاومة الخلايا المصنوعة على ارضيات ذات مقاومية واطئة وبمجال سطح خلفي يمكن ان تبقى واطئة تحت بعض الظروف . وهذه تعتبر طريقة بديلة اخرى لصناعة الخلايا الخاصة بالتركيز . انظر حاشية فقرة 8.4 والمرجع الخاص بها .

(Photolihography) ويتم زيادة سمك الاصابع المعدنية الى اكبر مايمكن بعملية الطلاء بالفضة كهربائياً .

وبالنسبة للخلايا الخاصة بالتركيز تصمم عادة بحيث يضاء السطح العلوي جزئياً فقط . وكمثال على ذلك نموذج التصميم الموضح في الشكل 11.6 الخاص بمنظومات التركيز النقطي ، فان المساحة حول الحافة التي لاتغطى بالعمود المعدني الرئيس هي مساحة التصميم . وتعتمد كفاءة الخلية اساساً على كمية الضوء الساقط على مساحة التصميم اكثر من المساحة الكلية للخلية . وان تغيير الكفاءة كدالة لنسبة التركيز عند درجة حرارة ثابتة للخلية موضحة في الشكل 11.7 . وبصورة عامة ، تزداد

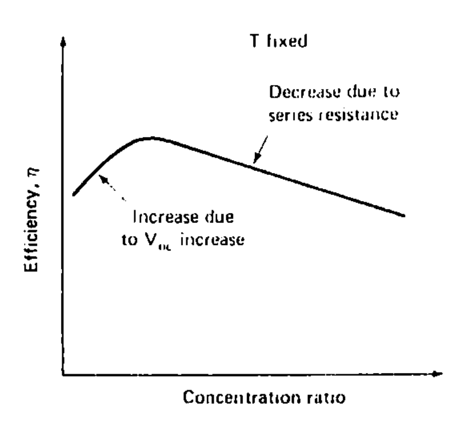


الشكل **11.6** خلية شمسية خاصة بمنظومة التركيز النقطي

(Cell courtesy of Applied Solar Energy Corporation.)

كفاءة الخلية مع زيادة نسبة التركيز عند قيم واطئة لهذا التركيز وتقل كفاءة الخلية مع زيادة نسبة التركيز عند قيم عالية . وتحدث ذروة الكفاءة عندما تقع نسب التركيز بين 20 وعدة مئات من الشموس . ان الزيادة في الكفاءة عند نسب تركيز واطئة تكون بسبب التزايد اللوغارتيمي للفولتية الناتجة مع زيادة كثافة التيار . وعندما تزداد كثافة التيار تزداد اهمية الفقد بسبب المقاومة المتوالية وبذلك تتناقص الكفاءة بتناقص عامل الملء (Fill Factor) .

تم تسجيل كفاءة ذروية اكثر من 20% للخلايا السليكونية الخاصة بالتركيز (مرجع 11.8) مقابل 25% للخلايا المبنية على GaAs (مرجع 11.9) . اما الكفاءة العملية الاعتيادية فتميل لتكون اقل بعض الشيء من هذه القيم وذلك لان في منظومات التركيز غالباً ما تعمل الخلية عند درجات الحرارة العالية نسبياً بسبب زيادة كثافة القدرة الساقطة عليها . ويقل الفقد البصري من كفاءة المنظومة اكثر . ان مصممي منظومات التركيز يحاولون الوصول الى منظومات تركيز بحيث تستقبل الخلايا فيها 85% من الضوء الساقط على فتحة المنظومة .



الشكل **11.7** رسم توضيحي يبين تغييراً نموذجياً في كثافة الخلية الشمسية عند درجة حرارة ثابتة مع زيادة نسبة التركيز .

11.6 منظومات ذات كفاءة عالية جداً

ULTRA HIGH-EFFICIENCY SYSTEMS

11.6.1 فكرة عامة . General

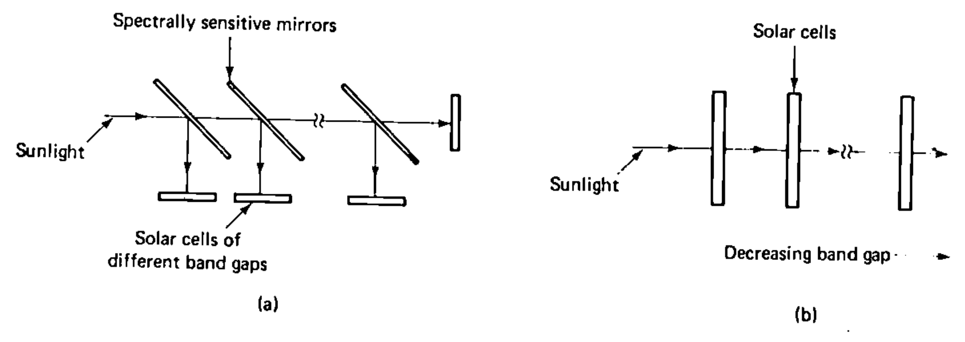
ان كفاءة التحويل للخلية الفوتوفولطائية في منظومة التركيز هو العنصر الرئيس لتحديد كلفة المنظومة . فهي تحدد فتحة المنظومة المطلوبة لنتاج معين . وفي الفقرات القادمة توضح بعض المفاهيم التي تساعد على الحصول على كفاءة عالية وامكانية الحصول على كفاءة عالية جداً احدى مميزات منظومة التركيز والتي جعلتها ان تكون طريقة بديعه للالواح الشمسية المسطحة .

11.6.2 مفاهيم الخلية المتعددة الفجوات Multigap-Cell Concepts

ان اختيار الفجوة المحظورة المثالية تكون عادة كحالة وسطية بين فجوة محظورة ضيقة بدرجة كافية بحيث لاتضيع الفوتونات التي تكون طاقتها غير كافية لخلق ازواج الكترون ـ فجوة ، وفجوة محظورة واسعة بدرجة كافية بحيث لاتضيع طاقة الفوتونات التي تخلق ازواج الكترون ـ فجوة وبطاقة تزيد على طاقة الفجوة المحظورة .

ومن الممكن عمل افضل ترتيب للخلايا بحيث توجه الفوتونات ذات الطاقة الواطئة في ضوء الشمس الى خلايا شمسية مصنوعة من شبه موصلات بفجوات محظورة ضيقة بحيث يمكن الافادة منها ، وتوجيه فوتونات الطاقة العالية الى خلايا ذات فجوات محظورة عريضة حتى لاتبدد طاقتها عند خلق ازواج الكترون ـ فجوة بطاقات تزيد على طاقة الفجوة المحظورة .

تم توضيح فكرتين لتوجيه الفوتونات بطاقات معينة الى خلايا بفجوات محظورة مناسبة كما مبين في الشكل 11.8 ، الاولى تعرف بتجزئة الطيف (spectrum spliting) اذ تستخدم فيها مرايا حساسة للطيف لتوجيه الضوء المناسب الى الخلايا المناسبة . والثانية تعرف بطريقة الخلية المتسلسلة (tandem cell) وتستخدم في هذه الطريقة مجموعة من الخلايا المتلاصقة مع بعضها بحيث تكون الخلية ذات الفجوة المحظورة الاوسع هي الاعلى ، وتمر الفوتونات ذات الطاقة الواطئة عبر الخلايا الى ان تصل الى خلية بفجوة محظورة مناسبة وتمتص . وبما ان كلتا الفكرتين لاتخلوان من الصعوبات التقنية المقارنة مع الخلايا الاعتيادية لذا فان فكرة الخلايا المتعددة الفجوات تكون مناسبة للمنظومات ذات نسب تركيز عالية .



الشكل 11.8 مفاهيم خلية متعدد الفجوات
(a) طريقة تجزئة الطيف
(b) طريقة خلية متسلسلة

الشكل 11.9 (a) الكفاءة القصوى للخلايا المتعددة الفجوات لضوء الشمس المركز وغير المركز (b) تأثير الخسائر البصرية . (من مرجع 11.10) .

ان اقصى كفاءة يمكن الحصول عليها بهذه الطريقة تعتمد على عدد الخلاية المستخدمة بفجوات مختلفة . والجدول 11.1 يبين هذه الاختلافات اضافة الى الفجوة المحظورة المثالية للخلايا . والكفاءات المبينة في الجدول هي لضوء شمس مركز الى 1000 شمس (AM1) والقيم المثالية مبينة في الشكل (a) 11.9 ومن الممكن ان تلاحظ بان هذه الطريقة تضاعف الكفاءة عند المقارنة مع الخلايا المصنوعة من السليكون البلوري . اما عملياً فتظهر بعض الخسائر البصرية التي لايمكن تجنبها مقارنة مع الخلايا الاعتيادية . وباستخدام القيم المناسبة للفقد البصري تقل الكفاءة الى قيم أكثر مناسبة كما مبين في الشكل (b) 11.9 . وهذا يقلل من اداء الخلايا المتسلسلة من 20 الى % 50 .

جدول 11.1 الفجوات المحظورة المثالية والكفاءات للخلايا متعددة الفجوات (1000 × AM1)

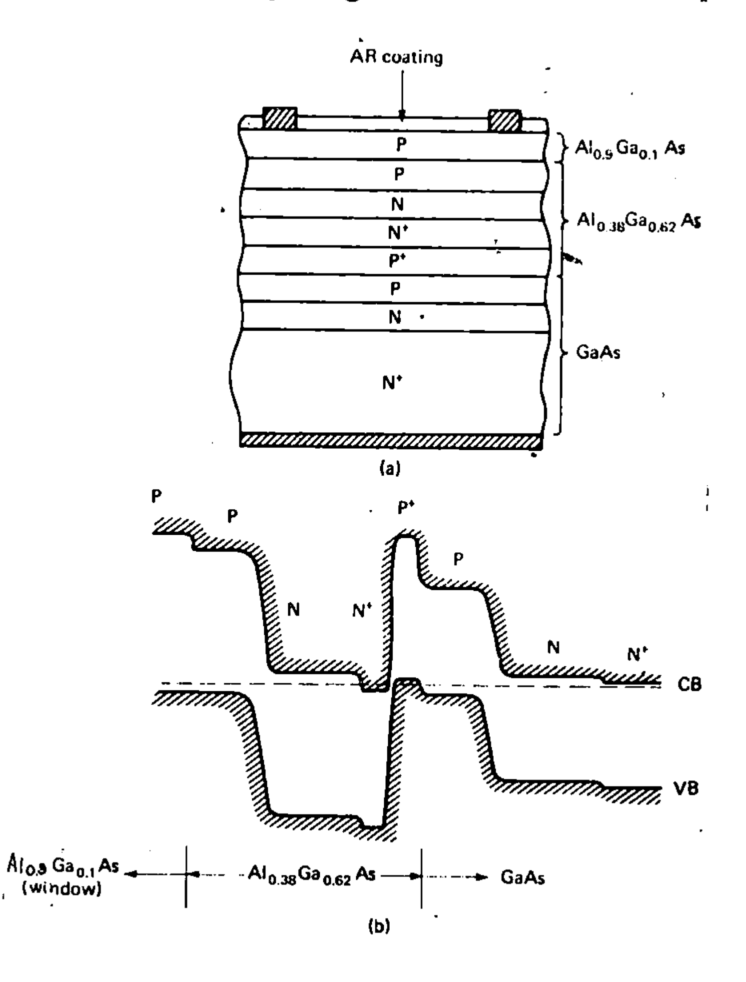
Number of cells	*System efficiency (%)*	*Band gaps (eV)*										
1	32.4	1.4										
2	44.3	1.0	1.8									
3	50.3	1.0	1.6	2.2								
4	53.9	0.8	1.4	1.8	2.2							
5	56.3	0.6	1.0	1.4	1.8	2.2						
6	58.5	0.6	1.0	1.4	1.8	2.0	2.2					
7	59.6	0.6	1.0	1.4	1.8	2.0	2.2	2.6				
8	60.6	0.6	1.0	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.6			
9	61.3	0.6	0.8	1.0	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.6		
10	61.6	0.6	0.8	1.0	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	
11	61.8	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6

Source: After Ref. 11.10.

لايعتبر اختيار مادة السليكون كمادة ذات فجوة محظورة ضيقة مثالية في منظومة تتكون من خليتين متلاصقتين ومع ذلك اذا أخذنا خلية سليكونية (فجوة محظورة 1.1 الكترون فولت) مع مادة بفجوة محظورة تقع بين 1.6 و 2.1 الكترون فولت ، فان هذا الترتيب يعطي اداءاً قريباً من الاداء المثالي (مرجع 11.11) . ولقد تم نشر اول نتائج تجريبية لخلايا متعددة الفجوات في عام 1978 وكان الترتيب مكوناً من خلية سليكونية واخرى ذات مفرق متباين $Al_xGa_{1-x}As$ (مرجع 11.11) ان الفجوة المحظورة من الجانب ذي الفجوة المحظورة الاضيق في الخلية المتباينة هي 1.61 الكترون فولت . ولقد تم استخدام مرآة تنقي الاطوال الموجية وتقوم بعكس الفوتونات التي تكون بطاقة اقل من

1.65 الكترون فولت على الخلية السليكونية ، اما الفوتونات الباقية فتمر لتسقط على الخلية المتباينة . وتحت ضوء مركز الى 165 شمس فان ما يخرج من هذه المنظومة يماثل كفاءة 28.5 % وهذا الكفاءة كانت اعلى كفاءة تم الحصول عليها في اجهزة فوتولطائية في حينه .

وفي كل خلية من الخلايا متعددة الفجوات تكون الفولتية والتيار الناتج متغيرة . هذا ومن الممكن بالطبع ان تؤخذ لكل خلية دائرة مستقلة خاصة بها مما يسبب تعقيدات اضافية عند التحليل الناتج المتوقع نظرياً . اما الطريقة البديلة



الشكل **11.10** (a) خليتان متسلسلتان مربوطتان على التوالي حيث تم عملها بعملية الانماء الفوقي على ارضية واحدة :

(b) الرسم التخطيطي لحزم الطاقة

الثانية وهي ربط الخلايا على التوالي. كما ذكرنا في الفقرة 6.6.4 . وان التيار الناتج من هذه الخلايا في هذا الترتيب هو تيار أردأ خلية. وللحصول على كفاءة متوقعة لترتيب متعددة الفجوات ، فمن الضروري تصميم انواع مختلفة من الخلايا بحيث تمتلك كل منها تيار الدائرة القصيرة نفسه . وهذه الفكرة اقترحت لتكون مقبولا لاختيار الفجوات المحظورة المناسبة للخلايا للحصول على اعلى كفاءة (مرجع 11.11) .

ان الفكرة المهمة في هذا المجال هي بناء مجموعة من الخلايا المتسلسلة والمتصلة على التوالي على ارضية واحدة . ويمكن عمل هذا التركيب باستخدام تقنية الانماء الفوقي المستخدمة في الخلاية المبينة على مادة GaAs التي مر ذكرها في الفقرة 10.4 . وكمثال على ذلك ، يبين الشكل 11.10 تركيب النبيطة ورسم تخطيطي لحزم الطاقة التي تماثل ربط التوال لخليتين متسلسلتين (مرجع 11.12) .

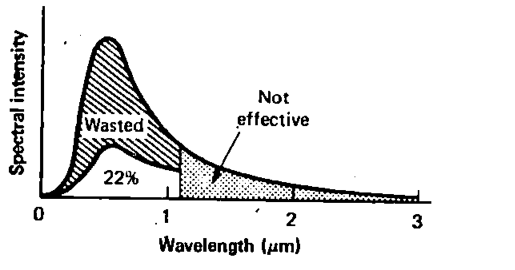
وتعمل الطبقة السطحية كنافذة شفافة بالنسبة للخلية التي تليها $Al_{0.38}Ga_{0.62}As$ ويوجد تحت هذه النافذة طبقتان مطعمتان بدرجة عالية حيث لهما وظائف عديدة وهما تعملان كمجال سطح خلفي بالنسبة للخلية الواقعة الى الاعلى وكمجال سطح امامي بالنسبة للخلية الواقعة الى الاسفل . وعرض منطقة الاستنزاف عند مفرق هاتين الطبقتين صغير جداً بحيث تستطيع الالكترونات الانتقال من حزمة التوصيل الى حزمة التكافؤ الواقعتين على جانبي المفرق بواسطة عملية النفق الكمي . وبالنتيجة تعمل كطبقة شفافة ظاهرية بالنسبة للخلية GaAs التي تليها . وتقع مثل هذه التراكيب المعقدة ضمن التقنيات المتطورة الخاصة بصناعة ليزرات اشباه الموصلات (مرجع 11.13) .

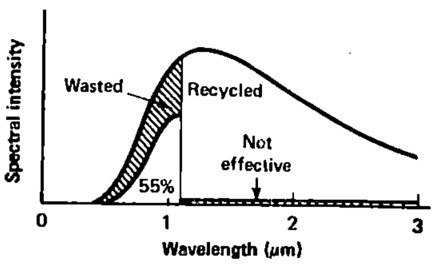
والمسألة المهة بالنسبة للخلايا متعدد الفجوات المتصلة على التوالي هي فيما اذا كان هناك تغيرات كبيرة في نسبة الطيف الموجود في ضوءالشمس خلال ظروف العمل الاعتيادي للخلايا . ومثل هذه التغيرات تسبب تغيرات في قيم التيار الناتج من الخلية والتي بدورها تؤثر بشكل ملحوظ على كفاءة المنظومة . ان البيانات الاولية المتوفرةحول هذه النقطة تشير انه على الرغم من حدوث تغيرات في الطيف بسبب الغيوم وقرب مغيب الشمس ، فمن غير المحتمل ان تكون من آليات الفقد المهمة (مرجع 11.11) .

11.6.3 تحويل الفوتوفولطائي الحراري Thermophotovoltaic Conversion

ان احد مصادر الفقد للطاقة في الخلايا الشمسية هو الفوتونات التي تكون بطاقة اعلى من طاقة الفجوات المحظورة التي تخلق زوج الكترون- فجوة واحدة فقط . وبالنتيجة يكون تأثير هذه الفوتونات العالية الطاقة مشابهة لتأثير الفوتونات ذات الطاقة الاوطأ بكثير . ويبين الشكل ((a) 11.11 مصير الطاقة الشمسية الساقطة على الخلية الشمسية كدالة للطول الموجي .

وعند اضاءة خلية شمسية بواسطة الضوء المنبعث من جسم اسود عند درجة حرارة اقل من (2000 °C) ، فان مصير الطاقة الساقطة يكون كما مبين في الشكل (b) 11.11 وبذلك يمكن الافادة من اكثر الفوتونات التي تكون طاقتها اعلى من طاقة الفجوة المحظورة . وان كفاءة الخلية الشمسية الحقيقية تتناقص وذلك لان عددا قليلا نسبياً من الفوتونات تمتلك طاقة اكبر من الفجوة المحظورة . ومع ذلك اذا اعيدت اغلب هذه الفوتونات الفعالة ثانية الى الجسم الاسود لتمتص فيه فانها تساعد الجسم الاسود للاحتفاظ على حرارته وبذلك فان الحالة تتغير . ومثل هذه الفوتونات لاتكون عديمة الفائدة بل تسهم بجزء من الطاقة اللازمة للحفاظ على درجة حرارة الجسم الاسود .



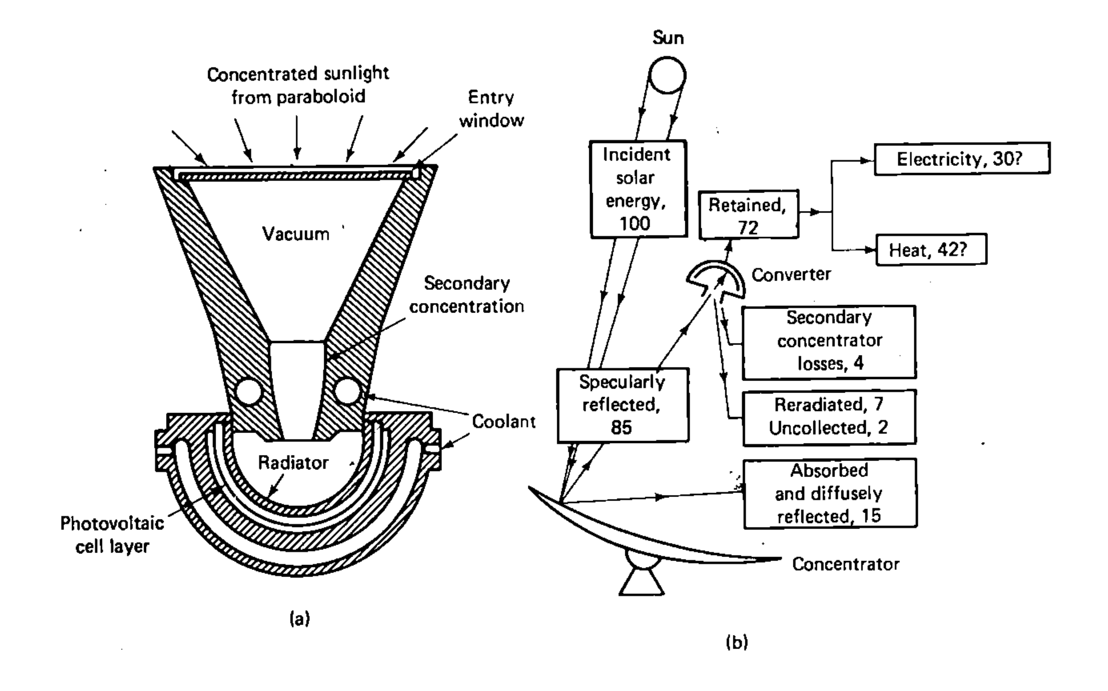


الشكل **11.11** الافادة من الطاقة الساقطة على الخلية السليكونية عند اضائتها باشعاع الجسم الاسود عند درجتين حراريتين مختلفتين :

(a) 6000 °C

(b) 2000 °C (من مرجع **11.5**)

وفي عملية التحويل الفوتوفولطائي الحراري (thermophotovltaic) (مرجع 11.4) للطاقة الشمسية ، تستخدم طاقة الشمس في تسخين المشعاع radiator ثم يقوم المشعاع ببعث اشعة لتسقط على الخلية الشمسية . وان الاشعاع ذا الطول الموجي الطويل الذي لاتفيد منه الخلية يعاد ثانية الى المشعاع . ويبين الشكل 11.12 الاجزاء الرئيسية لمحول فوتوفولطائي حراري ويكون السطح الخلفي للخلايا عالية الانعكاس عاكسا للاطوال الموجية الطويلة الساقطة على المشعاع ثانية . وعلى



الشكل 11.12 (a) الاجزاء الرئيسية للمحول الطاقة الشمسية بطريقة فوتوفولطائى حراري (b) منظومة تحويل الطاقة المناظرة وميزانية الطاقة الممكنة (من مرجع 11.15)

الرغم من ان الحد الاعلى للكفاءة النظرية لهذا التحويل عالية جداً ، فان الكفاءة العملية اقل من الكفاءة النظرية بكثير وذلك لوجود عدد من العمليات المتتالية اثناء التحويل (مرجع 11.15) .

11.7 الخلاصة SUMMARY

ان عملية تركيز ضوء الشمس تحول كلفة تقنية عمل الخلايا الشمسية الى كلفة اجهزة التركيز وتعقب مسار الشمس وللحصول على نسب تركيز اعلى من 12 فمن الضروري تعقب مسار الشمس .

ان الحدود العليا للكفاءة عند درجة حرارة معينة تزداد بزيادة التركيز . وهذا التأثير الايجابي يرافقه تشغيل الخلايا بدرجة حرارة عالية في منظومة التركيز . بالنسبة لمنظومات التركيز ذات النسب الواطئة من التركيزفتحتاج الى عملية تبريد غير فعال للخلايا ، اما التركيز بنسب اعلى من 50 يحتاج الى عملية تبريد فعال كدوير الماء مثلا مما يسبب انتاج الطاقة الكهربائية والطاقة الحرارية من ضوء الشمس في هذه المنظومة .

في منظومات التركيز تكون كفاءة الخلية عاملا حرجاً اكثر من كلفتها ويساعد ذلك على تحقيق زيادة الكفاءة الفوتولطائية بنمط معقد نسبياً كما ان المفاهيم المبينة على استخدام خلايا بفجوات محظورة مختلفة للافادة من جميع طاقات الفوتونات الموجودة في الطيف الشمسي ، ادى الى ظهور منظومات فوتوفولطائية تزيد كفاءتها على 30% . وبتحوير طيف الضوء الشمسي بواسطة الظاهرة الفوتوفولطائية الحرارية يمكن الحصول على كفاءة مشابهة لذلك .

تمارين

11.1 لنأخذ حالة مركزَ المادة الاضاءية luminescent concentrator الموضح في الشكل 11.3 . فأذا كان الضوء المنبعث من المادة الاضائية بشدة منتظمة في الاتجاهات جميعها . احسب نسبة الضوء المنحصر ضمن الصفيحة بواسطة الانعكاس الداخلي عندما تكون نقطة الانبعاث في منتصف الصفيحة . وافرض ان معامل انكسار مادة الصفيحة 1.5 .

11.2 خلية سليكونية بمفرق غير عميق (shallow junction) لها طبقة سطحية ذات مقاومية صفيحية 30 Ω/□ . عند شمس واحدة ، وتعطي نتائج من القدرة عند 450 مليّ فولت وكثافة التيار 30 ملي امبير/ سم٢ . أوجد اقصى مسافة مسموحة بين الاصابع المعدنية للقطب العلوي لتكون الخسارة في القدرة بحدود 4 % عند التشغيل تحت 100 شمس .

11.3 عند عمل الخلية الشمسية تحت شمس واحد.(100 ملي واط/ سم٢) تعطي فولتية الدائرة المفتوحة 0.6 فولت ونيار الدائرة القصيرة 0.6 امبير عنددرجة 300 كلفن فأذا علمت ان مسافة الخلية 20 سم٢ ولها عامل المثالية 1.2 والمقاومة المتتالية 0.007 اوم . بفرض ان المقدارين الاخرين لن يتأثرا بالضوء . اوجد الكفاءة المتوقعة لهذه الخلية عند 300 كلفن وارسمها كدالة لنسب التركيز في مدى 1 الى 50 [استخدام معادلة 5.17 لحساب تأثير المقاومة المتتالية على نتاج الخلية الشمسية] .

11.4 بالرجوع الى الشكل (b) 5.1 حاول ان تختار الفجوة المثالية للخلية الثانية من الخليتين المتسلسلتين على التوالي اذا كانت الخلية الاولى (a) من السليكون (E_g = 1.1 eV); (b) زرنخيد الكاليوم GaAs (E_g = 1.4 eV). احسب حدود الكفاءة في الحالتين تحت AM1.5 (83.2 mW/cm^2) واشعاع AM1.5 × 1000 اذا بقيت الخلية في درجة حرارة 300 كلفن .

REFERENCES المراجع

[11.1] W. T. Welford and R. Winston, *The Optics of Nonimaging Concentrators* (New York: Academic Press, 1978).

[11.2] A. Rabl, "Comparison of Solar Concentrators," *Solar Energy 18* (1976), 93-112.

[11.3] J. L. Watkins and D. A. Pritchard, "Real-Time Environmental and Performance Testing of Concentrating Photovoltaic Arrays," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D.C.*, 1978, pp. 53-59;

M. W. Edenburn, D. G. Schueler, and E. C. Boes, "Status of the DOE Photovoltaic Concentrator Technology Development Project," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D.C.*, 1978, pp. 1028-1039.

[11.4] D. R. Mills and J. E. Giutronich, "Ideal Prism Solar Concentrators," *Solar Energy 21* (1978), 423-430.

[11.5] C. F. Rapp and N. L. Boling, "Luminescent Solar Concentrators," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D.C.*, 1978, pp. 690-693.

[11.6] J. A. Castle, "10 kW Photovoltaic Concentrator System Design," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D.C.*, 1978, pp. 1131-1138.

[11.7] R. L. Donovan et al., "Ten Kilowatt Photovoltaic Concentrating Array," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D.C.*, 1978, pp. 1125-1130.

[11.8] E. C. Boes, "Photovoltaic Concentrators," *Conference Record, 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego*, 1980, pp. 994-1003.

[11.9] R. Sahai, D. D. Edwall, and J. S. Harris, Jr., "High Efficiency AlGaAs/GaAs Concentrator Solar Cell Development," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D.C.*, 1978, pp. 946-952.

[11.10] A. Bennett and L. C. Olsen, "Analysis of Multiple-Cell Concentrator/Photovoltaic System," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D.C.*, 1978, pp. 868-873.

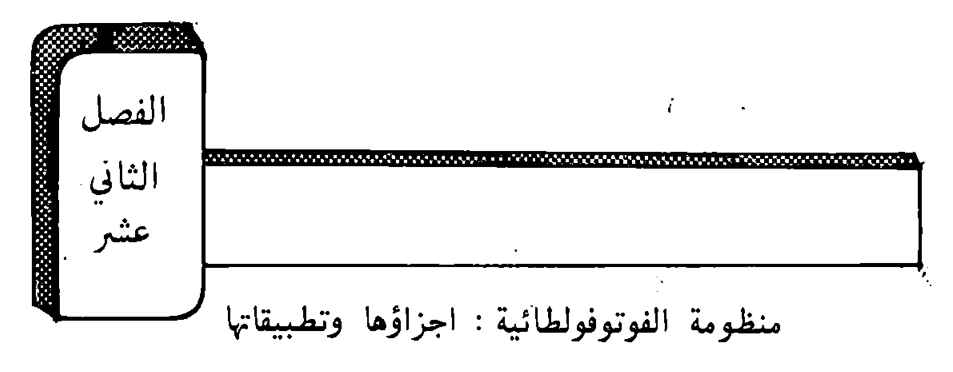
[11.11] R. C. Moon et al., "Multigap Solar Cell Requirements and the Performance of AlGaAs and Si Cells in Concentrated Sunlight," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D.C.*, 1978, pp. 859-867.

[11.12] S. M. Bedair, S. B. Phatak, and J. R. Hauser, "Material and Device Considerations for Cascade Solar Cells," *IEEE Transactions on Electron Devices ED-27* (1980), 822-831.

[11.13] E. W. WILLIAMS AND R. HALL, *Luminescence and the Light Emitting Diode*, Vol. 13, International Series on Science of the Solid-State, ed. C. R. Panydin (Oxford: Pergamon Press, 1978).

[11.14] R. M. SWANSON, "A Proposed Thermophotovoltaic Solar Energy Conversion System," *Proceedings of the IEEE* 67 (1979), 446–447.

[11.15] R. N. BRACEWELL AND R. M. SWANSON, *Proceedings of the Electrical Energy Conference*, Institute of Engineers, Australia, Publication 78/3, May 1978, pp. 52–55.



منظومة الفوتوفولطائية : اجزاؤها وتطبيقاتها

PHOTOUOLTAIC SYSTEM :COMPONENTS AND APPLICATIONS

12-1 المقدمة INTRODUCTION

تمت في الفصول السابقة مناقشة خصائص كثير من الاجزاء المهمة في منظومة فوتوفولطائية بشيء من التفصيل . اما في هذا الفصل والفصلين التاليين فتتم مناقشة الاجزاء الأخرى اللازمة للمنظومة الفوتوفولطائية كما يناقش اداء المنظومات وامكانية توفيرها تجارياً .

وبما ان انتاج المنظومة الفوتوفولطائية من القدرة متقطع ولايمكن التنبؤ بقيم ثابتة في اماكن مختلفة على الارض لذلك فانها تحتاج الى منظومة الخزن او مجهز القدرة الاحتياطي لتجهيز القدرة عند الحاجة . ويتم في هذا الفصل عرض الوسائل المختلفة للخزن .

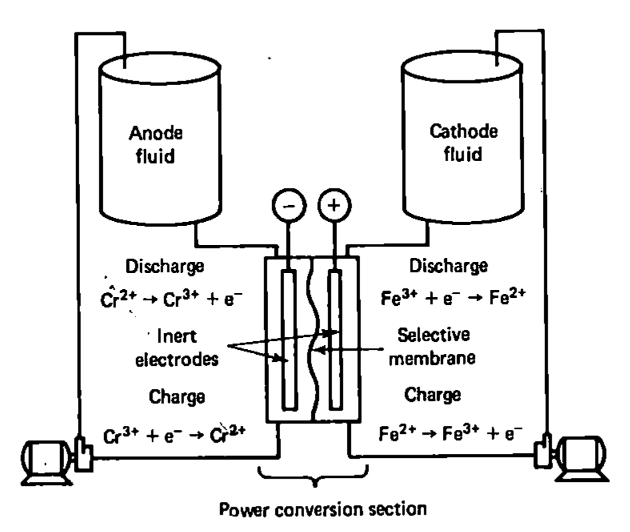
تولدّ الخلايا الشمسية تياراً مستمراً (d.c) وتتغير الفولتية التي تؤخذ عندها اقصى قدرة مع تغيير شدة ضوء الشمس ودرجة حرارة الخلية . وبما ان القدرة الكهربائية المستخدمة عالمياً من النوع المتناوب (a.c) ، فانه من الضروري استخدام جهاز تكييف القدرة (power conditioning) بين الالواح الشمسية والحمل الكهربائي . ويتم في هذا الفصل وصف مظاهر عامة لجهاز تكييف القدرة ايضاً .

كانت كلفة الخلايا الشمسية في الماضي السبب في حصر استخاماتها للاغراض الارضية كمنظومات مستقلة Stand-alone تستخدم في المناطق النائية فقط . بسبب الانخفاض المستمر لكلفة الخلية ، توسعت تطبيقاتها العملية (مرجع 12.1) في مجالات مختلفة وفي الفقرات القادمة يتم وصف بعض هذه التطبيقات .

12.2 خزن الطاقة ENERGY STORAGE :

12.2.1 نضائد كهروكيميائي Electrochemical Batteries

تم اختيار النضائد الكهروكيميائية (Electrochemical Batteries) بشكل سائد للخزن في المنظومة الفوتوفولطائية المستخدمة في الماضي . كما استخدمت نضائد حامض - رصاص (Lead-acid battries) ونضائد كادميوم - نيكل (Nickel-Cadmium) ايضاً ولكن بدرجة اقل . واهم مساوىء استخدام هذه التقنية لخزن الطاقة هو كلفتها العالية اضافة الى الكمية الكبيرة اللازمة من المادة الاولية لاستخدامها بشكل واسع .



الشكل 12.1 رسم تخطيطي لمنظومة خزن الطاقة باختزال/ اكسدة يمكن شحنها كهربائياً (من مرجع 12.4)

وهناك انواع عديدة مختارة من النضائد قيد الدرس والتطوير لاستخامها في الاجهزة الكهربائية للخزن لفترات قصيرة (مرجع 12.2) . ويرتبط مدى اهمية هذه النضائد جوهرياً بدرجة انخفاض كلفة نضائد خزن الطاقة الفوتوفولطائية وتطبيقاتها في المستقبل (مرجع 12.3) . واحسن منظومة مرجوة في هذا المجال هي منظومة النضائد المحتوية على كلورين - خارصين (Zinc-Chlorine) ونضائد درجات الحرارة العالية مثل نضائد كبريت - صوديوم (Sodium-sulfer) وكبريتيد الحديد - ليثيوم (Lithium-Iron sulfide)

واحدة من المنظومة المتطورة للخزن الكهروكيميائي والتي تبدو متلائمة تماما مع منظومات الفوتوفولطائية المستقلة هي منظومة نضيدة الاكسدة والاختزال (redox battry) (مرجع 12.4) وقد تم شرح مفهوم عملية الاكسدة والاختزال في الفقرة 9.7.2 ، وتعتمـــــــــد الفكرة على حالة الاكسدة والاختزال للايونات (species) . وفي نضائد الاكسدة والاختزال يوضع محلولان من نوع زوج اكسدة واختزال معزولين عن بعضهما . وخلال عملية الشحن يتأكسد احد الزوجين بينما يختزل الاخر وتحدث عملية معاكسة عند التفريغ .

ان محاليل زوج الاكسدة والاختزال الجديرة بالاهتمام هي محاليل الكلور الحامضية (acidified choloride solution) المحتوية على الكروم (زوج الاكسدة والاختزال Cr^{2+}/Cr^{3+}) والحديد (زوج الاكسدة والاختزال Fe^{2+}/Fe^{3+}) والشكل 12.1 يبين كيفية ترتيب محاليل الاكسدة والاختزال هذه في ابسط اشكالها . فكل خزان يحتوي على احد محلولي الاكسدة والاختزال ويتم شحن هذه المحاليل بواسطة المنظومة الفوتوفولطائية ، بحيث يظلان منعزلين تماماً بواسطة غشاء انتقائي جيد للتبادل الايوني (selective ion exchange) ويضع القطب الكهربائي لكل محلول من كاربون خامل ويمنع الغشاء انتقال ايونات الحديد والكروم بينما يسمح بانتقال ايونات الهيدروجين والكلور بسهولة وعند شحن منظومة الخزن فان محلول الكروم يحتوي على ايونات الكروم بحالة مختزلة (Cr^{2+}) ، اما محلول الحديد فيحتوي على ايونات الحديد المتأكسدة (Fe^{3+}) . وخلال عملية التفريغ تحدث التفاعلات الاتية :

1- عند الانود تتأكسد ايونات الكروم :

$$Cr^{2+} \longrightarrow Cr^{3+} + e^{-} \qquad (12.1)$$

2- وعند الكاثود تختزل ايونات الحديد :

$$Fe^{3+} + e^{-} \longrightarrow Fe^{2+} \qquad (12.2)$$

ومن خلال الغشاء تتحرك ايونات الهيدروجين من الانود الى الكثود وايونات الكلور بالاتجاه المعاكس للحفاظ على التعادل .

وتجري الالكترونات في الدائرة الخارجية محدثة بذلك تياراً كهربائياً بين طرفي الخلية . والفولتية الناتجة على قطبي الخلية تساعد على استمرار التفاعل بالاتجاه المعاكس اي شحن النضيدة ويمكن ربط عدد من هذه النضائد على التوازي

هايدروليكياً (hydraulically) وعلى التوالي كهربائيا وذلك لزيادة الفولتية الخارجة .

ومن اهم مميزات نضائد الاكسدة والاختزال التي تختلف عن النضائد التقليدية هي استقلالية حجم منظومة توليد القدرة ، وذلك باختيار حجم مقطع تحويل الطاقة وسعة الخزن التي تعتمد على اختيار حجم الخزان وتركيز المحلول . وهذه الميزة تجعل هذه النضائد مثالية للمنظومات الفوتوفولطائية المستقلة التي تتطلب الخزن لمدة اسبوع او اكثر لتجهيز الطاقة في الاوقات التي يكون فيها سطوع الشمس قليلاً ويمكن استخدام الانابيب والخزانات البلاستيكية الرخيصة مع محاليل كيمياوية معتدلة . وليس هناك عامل يحدد عدد دورات الشحن والتفريغ لهذا النوع من النضائد ويقدر العمر العملي لهذه النضائد بحوالي 30 سنة . اما مساوىء هذه الطريقة للخزن فتكمن في كثافة الطاقة الواطئة نسبياً للمحاليل . فحجم معين للمحاليل المشحونة مثلاً من الممكن ان ينتج كهرباء مساوياً للكهرباء الناتج من $\frac{1}{100}$ هذا الحجم للاجهزة التي تستخدم النفط كوقود ، مع ان الاختلاف الرئيس هو المحلول الالكتروليتي الذي يمكن ان يشحن ثانية .

12.2.2 وسائل الخزن بسعة كبيرة Large-Capacity Approaches

يمكن اعتبار النضائد الوسط المناسب لخزن الطاقة في منظومة فوتوفولطائية صغيرة وكبيرة على حد سواء . ويتبين من الفصل الرابع عشر ان خزن الطاقة في شبكة تجهيز القدرة الكهربائية التقليدية يعمل على ادخال منظومة فوتوفولطائية الى الشبكة . ومن الجدير بالملاحظة في هذا المجال انه قد دخل فعلاً عدد من تقنيات خزن الطاقة بسعات كبيرة في مثل هذه الشبكات الكهربائية .

ومن احسن الوسائل المستخدمة لخزن الطاقة الكهربائية المولدة بواسطة ضوء الشمس هو الخزن بعملية الضخ الكهرومائي (pumped hydro) في الفترات التي تكون الحاجة للقدرة الكهربائية قليلة حيث يتم خزن الطاقة بواسطة دفع الماء من مستوى واطىء الى خزان في مستوى اعلى . وفي الفترات التي تكون الحاجة عالية للطاقة يسمح بسقوط الماء المخزون الى الاسفل يتحرك التوربينات المولدة للطاقة الكهربائية . ومن الممكن استرداد حوالي ثلثي الطاقة الاصلية التي استخدمت لرفع الماء بهذه الطريقة . ومن الصعوبات التي تواجه هذه الطريقة هي قلة الاماكن المناسبة لاقامة مثل هذه المشاريع . والحل المقترح في هذا المجال هو نصب الخزان الواطىء على عمق مئات الامتار في باطن الارض وفي المناطق الصخرية . وهذا قد يساعد على حل المشكلة الى حد ما . وكلما زاد عمق الخزان الاسفل امكن تقليص سعة الخزان العلوي (مرجع 12.2) .

اما في طريقة خزن الطاقة بواسطة الهواء المضغوط فتستخدم طاقة اضافية لخزن الهواء المضغوط في خزان تحت الارض . وعلى الرغم من ان هذه التقنية اكثر تعقيداً من الناحية العملية من طريقة الضخ الكهرومائي ، الا ان لها فوائد أكثر من حيث كمية الطاقة المخزونة ومرونة الخزن في الخزانات الواقعة في باطن الارض (مرجع 12.2) . وتكون معدات الخزن قليلة وممكنة من الناحية الاقتصادية . وتم اول تطبيق عملي لهذه الطريقة في العالم بنصب محطة في منطقة هنتروف Huntrof في المانيا الغربية وبسعة تزيد على $\frac{1}{2}$ مليون كيلو واط - ساعة . وتكون طريقة الضخ الكهرومائي اكبر حجما من طريقة الهواء المضغوط بمرتبة واحدة للحصول على المنفعة الاقتصادية نفسها .

اما الطريقة الاخرى لخزن الطاقة الممكنة عملياً فهي خزن الطاقة الكهربائية بواسطة تحويلها الى الهيدروجين بعملية التحليل الكهربائي . وهذه الطريقة ملائمة جداً للاستخدام مع المنظومة الفوتوفولطائية بسبب الفولتية المستمرة (d.c) الواطئة اللازمة لعملية التحليل . وفي الحقيقة كما مر في الفقرة 9.7.3 فان عملية التحليل الكهربائي الضوئي يمكن ان تحصل مباشرة عند سطح شبه الموصل ولو ان كفاءتها واطئة في الوقت الحاضر . والهايدروجين كوسيلة لخزن الطاقة له عدة مزايا حيث يمكن نقله اقتصادياً الى مسافات بعيدة وبواسطة انابيب كما يمكن استخدامه كوقود في المحركات الاعتيادية لتوليد الطاقة المحركة ، اوفي خلية الوقود لتوليد الكهرباء بصورة كفوءة . وهذه المميزات المهمة تظهر فائدة الهايدروجين الاقتصادية ، فضلاً عن ان الهيدروجين يشكل الوقود الاساس للحياة البشرية (مرجع 12.5) . ومن اهم مشاكل الخاصة بخزن الطاقة في المنظومة الفوتوفولطائية هي كفاءة الخزن الواطئة في الوقت الحاضر (50%) .

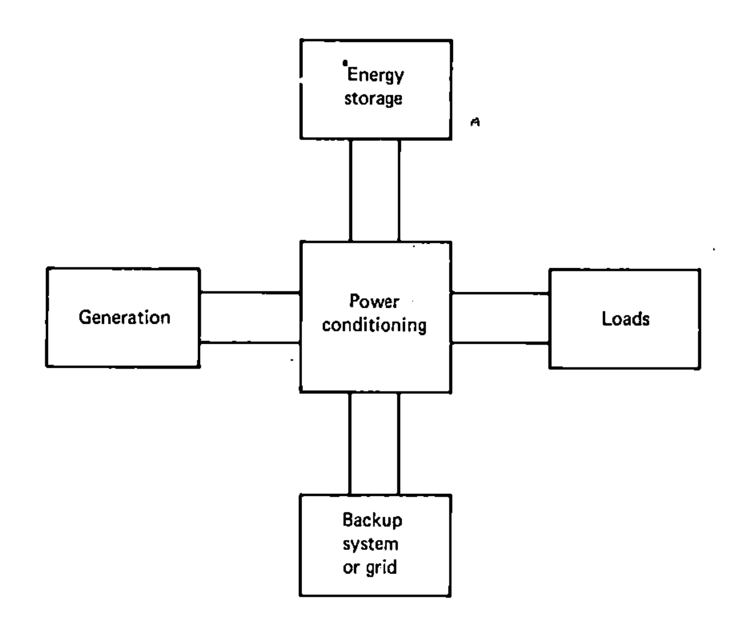
والخزن في المواد المغناطيسية ذات القابلية التوصيلية المفرطة (superconducting magnets) او خزنها كطاقة ميكانيكية في الدواليب الدوارة هي وسائل اخرى محتملة لخزن الطاقة على الرغم من انهما يبدوان جوهرياً اغلى من الوسائل الاخرى الموجودة في الوقت الحاضر .

12.3 معدات تكييف القدرة :

POWER CONDITIONING EQUIPMENTS

بصورة عامة تتكون المنظومة الفوتوفولطائية من الخلايا الشمسية ونضائد خزن الطاقة وبعض اجهزة مساعدة مثل مولد مساعد او شبكة مجهزة للكهرباء والحمل الكهربائي ، من نوع d.c او a.c لذا فهناك ضرورة لعملية تكييف القدرة

والسيطرة عليها وذلك بتنظيم التوافق بين عناصر هذه الانظمة المختلفة . وفي الشكل 12.2 رسماً توضيحياً لهذا الترتيب .



الشكل 12.2 في كثير من الحالات لاتستخدم معدات تكييف القدرة لغرض التوافق بين اجزاء مختلفة للمنظومة الفوتوفولطائية فحسب بل تقوم ايضا بوظيفة السيطرة والوقاية .

ان ابسط منظومة فوتوفولطائية هي التي ترتبط فيها الخلايا مباشرة بالحمل الكهربائي وتقوم بتجهيز القدرة كلما اضيئت بكمية كافية من الضوء . وكمثال على هذه المنظومة ، مضخة الماء التي تدار بواسطة محرك d.c لتشغل المضخة . اما في المنظومات البسيطة الاخرى التي تجهز الحمل بتيار مستمر d.c من نضيدة كافية لتوليد هذا التيار تكون موجودة مع المنظومة وبذلك لاتحتاج المنظومة الى مولد كهربائي مساعد . وفي هذه الحالة نحتاج الى منظم (regulator) ليحافظ على النضائد من الشحن الزائد في فترات الايام المشمسة . اما المنظومات الاكثر تعقيداً فهي المنظومات التي تشبه المنظومة المذكورة اعلاه ولكنها تقوم بتجهيز تيار متناوب a.c وفي هذه الحالة يتطلب محول عاكس (invertor) يقوم بتحويل التيار المستمر الناتج من الخلايا الشمسية ونضائد الخزن الى تيار متناوب . اما في المنظومات المعقدة جداً فهناك مولد احتياطي اضافي ايضاً لتجهيز الشبكة بالقدرة اللازمة عند الحاجة . تحتاج هذه المنظومات المعقدة الى بعض اشكال السيطرة والتنظيم وتحديد وقت تشغيل مجهز القدرة الاحتياطي .

ان اهم الجهود في مجال تطوير تقنية تكييف القدرة يكمن في محاولة تطوير اداء المحولات العاكسة وخفض اسعارها وان المقومات الرئيسة لتحسين الاداء هي الكفاءة وعدم نضوب القدرة في الحمل (مرجع 12.6).

12-4 تطبيقات المنظومات الفوتوفولطائية

PHOTOVOLTAIC APPLICATION

ان الكلفة العالية للخلايا الشمسية في الماضي حصرت استخداماتها وجعلت استخدامها يقتصر على تزويد المناطق النائية والبعيدة عن شبكة الكهرباء بكميات صغيرة من القدرة . وتعتبر منظومات الاتصال عن البعد (telecommunication) العمود الفقري في هذا المجال . حيث اخذت تتدرج من محطات التقوية الموجات الدقيقة التي تحتاج الى محطات خزن بسعة عدة كيلو واط ذروة الى الواح شمسية صغيرة تولد عشرات من الواط للخدمات التلفونية والمذياعية الراديو في المناطق النائية .

ومن الاستخدامات الكبيرة الاخرى للمنظومات الفوتوفولطائية هي تزويد الطاقة للملاحة البحرية واجهزة الانذار عند تقاطع السكك الحديدية واجهزة قياس الطقس والمعدات الخاصة بمراقبة تلوث البيئة والوقاية من التآكل باستخدام تقنية التيار الموجة . اضافة الى استخداماتها في بعض الاجهزة الشخصية مثل الحاسبات والساعات . كما بدىء باستخدام الخلايا الشمسية كمصدر للقدرة لتشغيل التلفزيون التربوي في الاقطار النامية وفي برامج وسائل تجميد الاغذية والحفاظ عليها في هذه الاقطار .

الى انخفاض المستمر في كلفة الخلايا الشمسية في السنوات الاخيرة ساعد على استخدام الخلايا الشمسية في تطبيقات اخرى خاصة في البلدان المتقدمة (مرجع 12.7) . ومن ذلك ضخ المياه للاستخدامات الزراعية على نطاق صغير وتصفية المياه للحصول على الماء الصالح للشرب . وانشاء برامج لمساعدة التنمية ربما تكون احد الوسائل لتشجيع سوق هذه الخلايا والتغلب على مشاكل ارتفاع الكلفة لهذه المنظومات .

ان استخدام المنظومة الفوتوفولطائية اول مرة اثر بشكل فعال على حاجة العالم للطاقة عندما استخدمت لتجهيز القدرة للاغراض السكنية في امريكا الشمالية . والنمط المرجح لهذا الاستخدام هو ربط المساكن بشبكة تعمل كوسط للخزن لمدة طويلة كما يوضح في الفصل الرابع عشر . وظهرت تقنيات عديدة مبنية على السليكون والتي مرّ ذكرها في الفصل السابع قابليتها على انتاج خلايا باسعار مناسبة لهذه الاستعمالات .

اما استخدام الخلايا الشمسية لتوليد القدرة على نطاق واسع كما في محطات القدرة المركزية (central power plant) بسعة كبيرة فيتطلب خفض كلفة الخلايا الى نصف كلفة الخلايا المستخدمة لاحتياجات المنزلية لتستطيع منافسة مصادر الطاقة التقليدية . ان التقنيات المبنية على خلايا الاغشية الرقيقة من المحتمل ان تصل الى مثل هذه الاسعار . تم مناقشة بعض المميزات المرغوبة الاخرى في هذا النمط من التشغيل في الفصل الرابع عشر .

12.5 الخلاصة SUMMARY

اي منظومة فوتوفولطائية تحتاج عناصر اخرى غير الخلايا الشمسية لوحدها الا في عدد قليل من التطبيقات . وتتكون منظومة الفوتوفولطائية من خلايا ومنظومة خزن الطاقة ومعدات تكييف القدرة واجهزة السيطرة ومولدات القدرة الاضافية . واهم عنصر في معدات تكييف القدرة هو المحول العاكس الذي يقوم بتحويل التيار المستمر الناتج من الخلايا ونضيدة الخزن الى تيار متناوب للاستعمال في الشبكات الكهربائية .

وفي الماضي اقتصر استخدام الخلايا الشمسية نسبياً في تجهيز المناطق النائية بكميات صغيرة من القدرة . اما في المستقبل فتظهر استخدام اكثر واوسع لتطبيقات هذه الخلايا اذا استمر انخفاض اسعارها بالشكل الحالي . وان تجهيز القدرة للاحتياجات المنزلية على شكل مساحات مربوطة بشبكة تجهيز القدرة في الولايات المتحدة تبدو عملية من الناحية الاقتصادية خاصة مع التقنيات الجديدة التي هي الان في مرحلة البحث والتطوير .

واذا اريد استخدام هذه الخلايا لتوليد قدرة بكميات كبيرة في محطات القدرة المركزية فيجب ان تكون كلفة الخلية المستخدمة بحدود نصف كلفة الخلية المستخدمة لاغراض السكنية . فان تقنية الاغشية الرقيقة التي تستخدم اقل مايمكن من مادة شبه الموصلة هي التقنية المرشحة لانتاج خلايا شمسية بهذه الكلفة .

تمارين

12.1 تحتاج منظومة الفوتوفولطائية الى نضيدة خزن لتجهيز القدرة الذروية بـ-10 كيلو واط وبمعدل 1 كيلو واط . أفرض ان نضيدة حامض ـ رصاص المتطورة باستطاعتها تجهيز القدرة الذروية بكلفة 100 دولار لكيلو واط ـ ساعة من الطاقة المخزونة ، بينما في منظومة اكسدة/ اختزال تكون كلفة القدرة الذروية 100 دولار لكيلو واط لمقطع تحويل الطاقة و 40 دولار لكيلو واط ـ ساعة لخزن الطاقة . اي من المنظومتين يكون اقتصادياً للشراء لـ (a) لـ 4 ساعات من الخزن (b) لـ 5 ايام من الخزن؟

REFERENCES

المراجع

[12.1] D. COSTELLO AND D. POSNER, "An Overview of Photovoltaic Market Research," *Solar Cells 1* (1979), 37-53.

[12.2] F. R. KALHAMMER, "Energy Storage Systems," *Scientific American 241*, No. 6 (December 1979), 42-51.

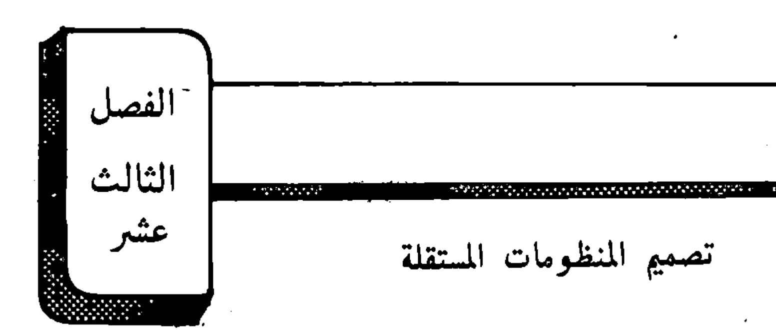
[12.3] *Handbook for Battery Energy Storage in Photovoltaic Power Systems*, Final Report, DOE Contract No. DE-AC03-78ET 26902, November 1979.

[12.4] L. H. THALLER, "Redox Flow Cell Energy Storage Systems," Report No. DOE/NASA/1002-79/3, NASA TM-79143, June 1979.

[12.5] J. O'M. BOCKRIS, *Energy: The Solar Hydrogen Alternative* (London: Architectural Press, 1975).

[12.6] G. J. NAAIJER, "Transformerless Inverter Cuts Photovoltaic System Losses," *Electronics 53*, No. 18 (August 14, 1980), 121-126.

[12.7] L. ROSENBLUM et al., "Photovoltaic Power Systems for Rural Areas of Developing Countries," *Solar Cells 1* (1979), 65-79.



تصميم المنظومات المستقلة

DEDIGN OF STAND-ALONE SYSTEMS

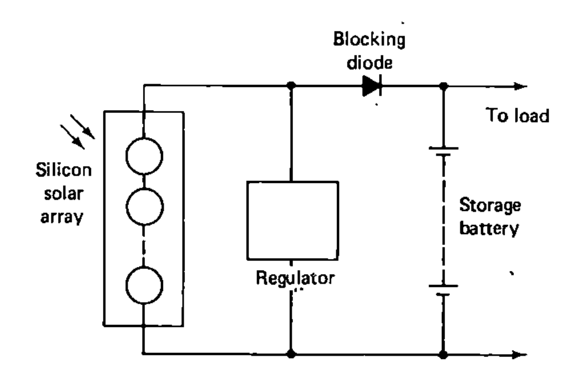
13-1 المقدمة INTRODUCTION

في الماضي كان السوق الرئيس للمنظومات الفوتوفولطائية مقتصراً على استخدامها لتجهيز القدرة بكميات صغيرة للاماكن النائية . وتعمل هذه المنظومات عادة بدون مساعدة مجهزات القدرة الاحتياطية ولهذا تعتبر القدرة الرئيسة هي القدرة الناتجة بواسطة ضوء الشمس . ومثل هذه المنظومات توضح في هذا الفصل . الشكل 13.1 يبين رسماً تخطيطياً لمنظومة مجهزة بالقدرة الكهربائية الناتجة من ضوء الشمس وإن الحمل في مثل هذه المنظومة الصغيرة يجهز بالتيار المستمر (d.c)كما يتولد من الخلية مباشرة وفضلاً عن وجود مصفوفات اللوح الشمسي ونضائد الخزن فهناك ايضاً ثنائي يمنع تسرب الشحنة من النضيدة خلال الخلايا في الليل وكذلك المنظم(regulator)لمنع الشحن الزائد للنضيدة خلال فترات الى تكون فيها مستوى الاضاءة عالياً .

13.2 أداء اللوح الشمسي SOLAR MODULE PERFORMANCE

يتكون اللوح الشمسي بصورة عامة من عدد من خلايا شمسية متصلة مع بعضها على التوالي لتوليد فولتية تكون كافية لشحن نضيدة بـ 12 فولت . وان هذه الألواح تربط عادة إما على التوالي مع بعضها لزيادة الفولتية الناتجة من المنظومة أو على التوازي لزيادة التيار الناتج . ويكون عدد الخلايا المربوطة على التوالي اللازمة لشحن نضيدة 12 فولت اكثر من العدد المتوقع نظرياً لأسباب عديدة، فالنضائد رصاص ـ حامض تحتاج اكثر من 14 فولت لشحن نضيدة 12 فولت . وإذا إستخدم الثنائي السليكوني كثنائي مانع (blocking diode) يتطلب على الأقل 0.6 فولت اضافي لينحاز الثنائي باتجاه الأمام . إضافة الى ذلك ، فإن درجة حرارة اللوح الشمسي ترتفع اكثر من $60\ C^{o}$ بصورة متكررة عند استخدامها في الحقل ،

وإن فولتية الدائرة المفتوحة للوح تتناقص حوالي 0.4% لكل درجة مئوية (الفقرة 5.3) . وهذا يعني اي مقدار التناقص في فولتية الدائرة المفتوحة للوح ذي 20 فولت عند 25C° يكون بحدود 3 فولت وكما تبين في الفقر 6.6.2 ان الاختلاف في تصاميم الالواح تجعل تصل الى درجات حرارية مختلفة في لاستخدامات الحقلية . وان الألواح التي تسمح بدوران الهواء من خلفها تكون عادة أبرد من التي لاتسمح بدوران الهواء .



الشكل 13.1 شكل مبسط لمنظومة مستقلة للقدرة الشمسية (من مرجع 13.2)

وللاداء الجيد تنصب الألواح نحو الجنوب في نصف الشمالي من الكرة الأرضية ونحو الشمال في النصف الجنوبي من الكرة الأرضية وبزاوية عن الافق تعتمد على خط العرض للمكان . وللحصول على اعلى نتاج على طول مدار السنة فان هذه الزاوية تقريباً تساوي زاوية العرض . وللمنظومات التي تشرح في هذا الفصل والمزودة بنضيدة خزن تكفي من 10 الى 30 يوماً وتزيد القيمة المثالية لهذه الزاوية بـ 15 درجة في فصل الشتاء لترفع القدرة الخارجة في هذا الفصل .

ان اللوح المصمم لشحن نضيدة 12 فولت يكون قادراً على توليد فولتية كافية خلال ساعات النهار المشمسة ليستمر بالعمل . ويتناسب التيار الناتج طردياً مع شدة الضوء الساقط على اللوح . وبهذا فإن جوهر الاهتمام في تصميم المنظومة في هذا الفصل يكون على التيار الناتج من اللوح .

والعامل الاخر ذو العلاقة بعمل اللوح الشمس هو تأثير تراكم الغبار ، وهذا التأثير دوري ويقل اهميته بعد سقوط المطر . وبالنسبة للألواح المغطاة بالزجاج ، يتبين من البيانات المتوفرة ان مقدار الفقد الناتج من هذا التأثير يتراوح بين 5 الى 10% .

13.3 أداء النضيدة BATTERY PERFORMANCE

13.3.1 متطلبات الأداء Performance Requirement

ان السمة المميزة للمنظومات الفوتولطائية والتي قد تجعلها منافسة مع مصادر الطاقة الاخرى من خيث الكلفة ، هي الوثوقية العالية (high reliability) . والكلفة الواطئة للأدامة وللحصول على هذه المميزات تم تصميم هذه المنظومات مع نضائد ثانوية كبيرة لتساعدها على العمل في الظروف الجوية الرديئة . اما صيانة النضيدة في الحقيقة ، فهي أهم الصيانة اللازمة للمنظومات الفوتوفولطائية المستقلة .

وعند استخدام نضائد بهذا الحجم تكون دورة الخزن والتفريغ المفروضة على النضيدة موسمية حيث يتم شحن النضيدة في الصيف ويتم تفريغها في الشتاء وتصاحب هذه الدورة الموسمية دورة أخرى اصغر هي دورة يومية اذ تشحن النضيدة في النهار وتفقد نسبة صغيرة من شحنتها في الليل . وبسبب الطبيعة الموسمية للخزن فإن النضيدة التي تكون لها خصائص تفريغ ذاتي واطيء هي الافضل . والكفاءة العالية للخزن (نسبة الشحنة التي يمكن إستخلاصها من النضيدة الى الشحنة الداخلة في النضيدة) في النضيدة مرغوبة ايضاً .

13.3.2 نضائد رصاص ـ حامض

Lead-Acid Batteries

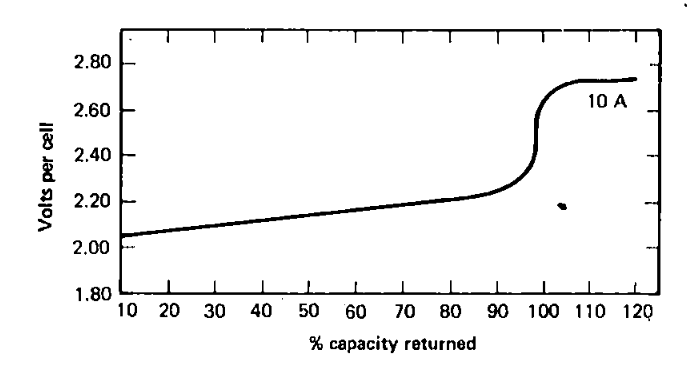
ان اغلب النضائد الشائعة المستخدمة مع المنظومات الشمسية هي نضائد حامض ـ رصاص . اما نضائد رصاص ـ أنتمون الشائعة الأستخدام في السيارات غير ملائمة للأستعمال في المنظومات الفوتوفولطائية المستخدمة وذلك بسبب تفريغها الذاتي العالي (أي 30% من السعة لكل شهر) وقصر عمرها .

ان النضائد التجارية الاكثر ملائمة للمنظومات المستغلة هي النضائد المستخدمة في المحطات الثابتة او المتحركة وتم تصميم هذه النضائد لتستخدم كمصادر للقدرة الاضطرارية في مجهزات القدرة المتواصلة حيث تبقى النضائد تامة الشحن الى أن يحدث فشل او عطب في المصدر الرئيس وتقوم النضيدة بتزويد الحمل مباشرة بالقدرة اللازمة . والعمر العملي لهذه النضيدة في مثل هذا العمل الاحتياطي اكثر من 15 سنة عادة . ومعدل تفريغ هذه النضائد إعتيادياً 8 أو 10 ساعات وتستخدم فيها اما صفائح رصاص ـ كالسيوم او صفائح من الرصاص النقي . وقد تم مؤخراً تطوير هذا النوع من النضائد ليلبى المتطلبات الخاصة بعمل منظومات فوتوفولطائية (مرجع 13.1) .

وفي المنظومات التي يتم وصفها في هذا الفصل تستخدم عادة النضيدة بطريقة غير اعتيادية ، حيث انها تبقى تامة الشحن في الصيف بينما يكون شحنها وقت الشتاء غالباً جزئياً . ويمكن أن تسبب الفترات الطويلة من حالة الشحن الواطيء تكوين بلورات من كبريتيد الرصاص على صفائح النضيدة اكبر بكثير من البلورات التي قد تتكون عند التفريغ الاعتيادي . وهذه العملية تعرف بالكبرته (sulfation) وهي تسبب الفقد في السعة وتقليل عمر النضيدة . وأحسن تصميم عملي هو جعل سعة خزن النضائد الكبيرة الى درجة كافية بحيث تبقى نسبة كبيرة من الشحنة المخزونة خلال أشهر الشتاء . وتحقق هذه العملية الحفاظ على تركيز حامض الكبريتيك في المحلول الالكتروليتي عاليا نسبياً في هذه الاشهر مما يقلل من احتمالية انجماد المحلول الالكتروليتي (مرجع 13.1) .

تولّد الخلايا الشمسية في الصيف قدرة اكبر من الحاجة المطلوبة وهذا يسبب الشحن الزائد للنضيدة . وهذه الحالة غير مرغوبة لاسباب عديدة منها . انها يمكن أن تتسبب في توليد غازي الهايدروجين والاوكسجين من النضيدة التي يعرف بعملية تصاعد الغازات (gassing) مما يسبب الفقد في المحلول والخطورة على الموقع الذي تكون فيه وهي ايضاً تعمل على زيادة نمو البلورات على الصفائح مما يسبب في انفصال المادة الفعالة عن الصفائح وبالتالي قصر عمر الخلية . ومن جهة أخرى ، تمتاز نضائد حامض ــ رصاص بالسماح بشحن الدوري الزائد وكنتيجة لتصاعد الغازات يتهيج (agitate) المحلول الألكتروليتي وبالتالي يمنع التنضيد (stratification) اي ترسيب المواد بحيث تكون الطبقات المركزة اكثر في المستويات الاوطأ ويساعد الشحن الزائد ايضاً على اعطاء الفرصة للخلية الضعيفة في النضيدة لتشحن بشكل تام (مرجع 13.1) .
الشكل 13.2 يبين كيفية تغير الفولتية عبر طرفي النضيدة مع كمية الشحنة المخزونة عند شحنها بتيار ثابت . وعند شحن النضيدة الى حوالي 95% من سعتها يلاحظ إرتفاع حاد في الفولتية على طرفي النضيدة ، وهذا يشير الى شروع عملية تصاعد الغازات. وللحد من تصاعد الغازات ولاستفادة من فترات الشحن الزائد يتم عادة التوفيق (compromize) بينهما باستخدام منظم الفولتية لتحديد الفولتية في كل خلية من النضيدة بحدود 2.35 فولت للحالة المبينة سابقاً (مرجع 13.2) .

ومن الاعتبارات الاخرى ذات العلاقة بهذا الموضوع هي تغيير سعة النضيدة مع معدل التفريغ ودرجة الحرارة . وتحدد عادة سعة النضيدة بمعدل التفريغ المعطى . ويبين الشكل (13.3) مثالاً على ذلك اذ تم تفريغ النضيدة مقياساً بأمبير ــ ساعة بمعدلين مختلفين للتفريغ . ويتم تحديد سعة النضيدة بـ 550 أمبير ــ

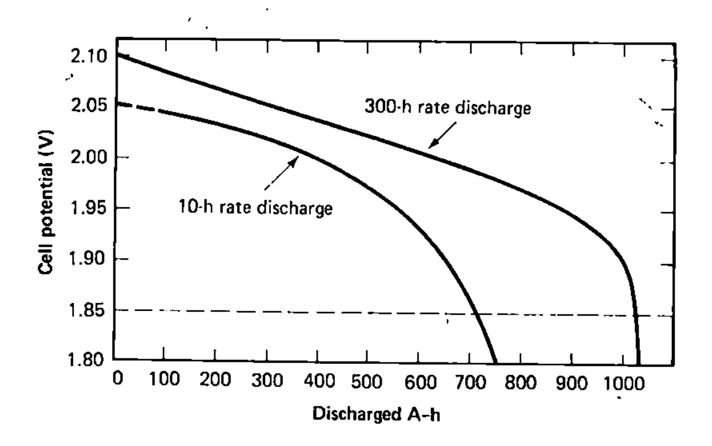


الشكل 13.2 خواص الشحن بتيار ثابت لنضيدة رصاص ـ حامض والمناسب للاستخدام في المنظومة الشمسية (من مرجع **13.2**)

ساعة عندما تفرغ النضيدة بمعدل 10 ساعة اذ تصل فولتية كل خلية 1.85 فولت (وهذا يعني سحب 55 أمبير في مدة 10 ساعات متواصلة). ومن الممكن ملاحظة ان سعة النضيدة عند معدل 10 ساعات أعلى من الحد المسموح به. عند معدل 300 ساعة الذي يكون مثالياً في الاستخامات الشمسية تكون سعة النضيدة تساوي ضعف القيمة المحددة لها تقريباً. وهذا يعني انه عند تصميم أي منظومة فوتوفولطائية يجب ان يأخذ معدل التفريغ بنظر الاعتبار ايضاً اضافة الى سعة النضيدة.

وسعة الخزن تتناقص مع هبوط درجة الحرارة وهذه حالة غير مرغوبة لأن معظم استخدام المخزون يكون في الشتاء. وكقاعدة عامة فإن السعة تتناقص بـ 1% لكل درجة حرارية تحت درجة الحرارة $20C^{o}$. وبسبب هذه الحالة واحتمالية تجميد المحلول الالكتروليتي، يكون من الأفضل عزل النضيدة عن الاجواء الباردة غير الطبيعية. ومن الجهة الاخرى، فان الدرجات الحرارة العالية تقصر عمر النضيدة وتزيد معدل التفريغ الذاتي وتزيد من إستعمال كمية المحلول الالكتروليتي كذلك. وهذا يعني ان النضائد تحتاج الى وضعها في مكان ملائم لتتجنب الحرارة العالية.

وعند شحن وتفريغ نضيدة بمعدلات متوسطة، يمكن إسترداد حوالي 80-85% من الشحنة المخزونة في نضيدة حامض ـ رصاص. والجزء الكبيرة من هذا القصور في كفاءة النضيدة ينشأ من عملية صعودالغازات التي تحدث خلال مرحلة الشحن. وعملية صعود الغازات نتيجة الشحن الزائد. في المنظومات الفوتوفولطائية في الشتاء تكون بعيدة الأحتمال، اذ تقوم النضيدة بتزويد الحمل بكمية كافية من القدرة.



الشكل **13.3** منحنيات التفريغ بتيار ـ ثابت عند معدلات التفريغ المختلفة (من مرجع **13.2**)

ولذا فإن كفاءة الخزن في أشهر الشتاء تكون اعلى من الصورة المبينة سابقاً . ولقد تم الحصول على كفاءة خزن الشحنة بحدود 95% (مرجع 13.3) .

13.3.3 نضائد نيكل ـ كادميوم Nickel-Cadmium Battries

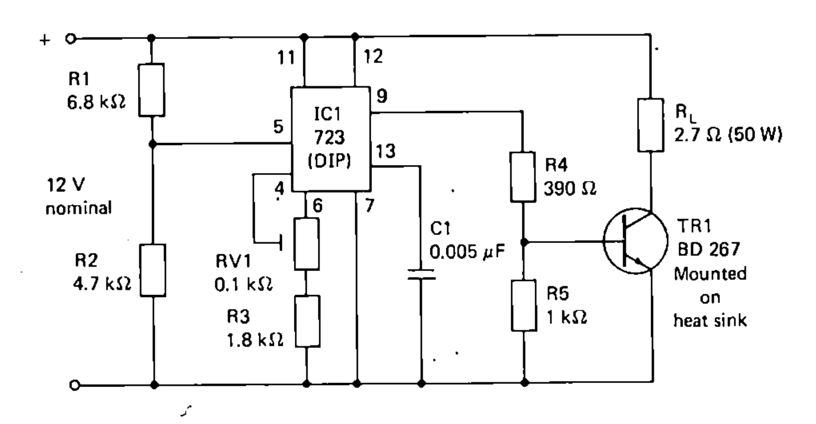
يستخدم نضائد نيكل ـ كادميوم من نوع الصفيحية الجيبية في المنظومات الشمسية ايضاً . ومن أهم محاسنها مقارنة مع نضائد الرصاص ـ الحامضية التي تم وصفها في الفقرة 13.3.2 هي :

1- قابليتها على الشحن الزائد بدون اي ضرر
2- قابليتها على العمل لفترات طويلة وبشحن جزئي بدون اي ضرر .
3- المتانة الميكانيكية مما يجعل نقلها أسهل .
4- قابليتها على مقاومة الأنجماد بدون ضرر .

اما اهم مساوئها الرئيسة فهي :

1- الكلفة العالية (ان الحجم الكبير بسعة معينة ترتفع كلفته ثلاث مرات اعلى من الحجم الصغير) .
2- كفاءة خزن الشحنة فيها واطئة (55-60% لعمل المنظومة الشمسية)
3- عدم الزيادة المحسوسة في السعة بسبب معدل التفريغ الواطيء عند استخدامها مع المنظومات الشمسية .

وحالياً فان محاسن هذه النوع من النضائد اكثر من مساوئها في معظم تطبيقات الخلايا الشمسية .



الشكل 13.4 منظم متوازي للمصفوفة من الالواح الشمسية بـ 12 فولت 601 واط (من مرجع 13.2) .

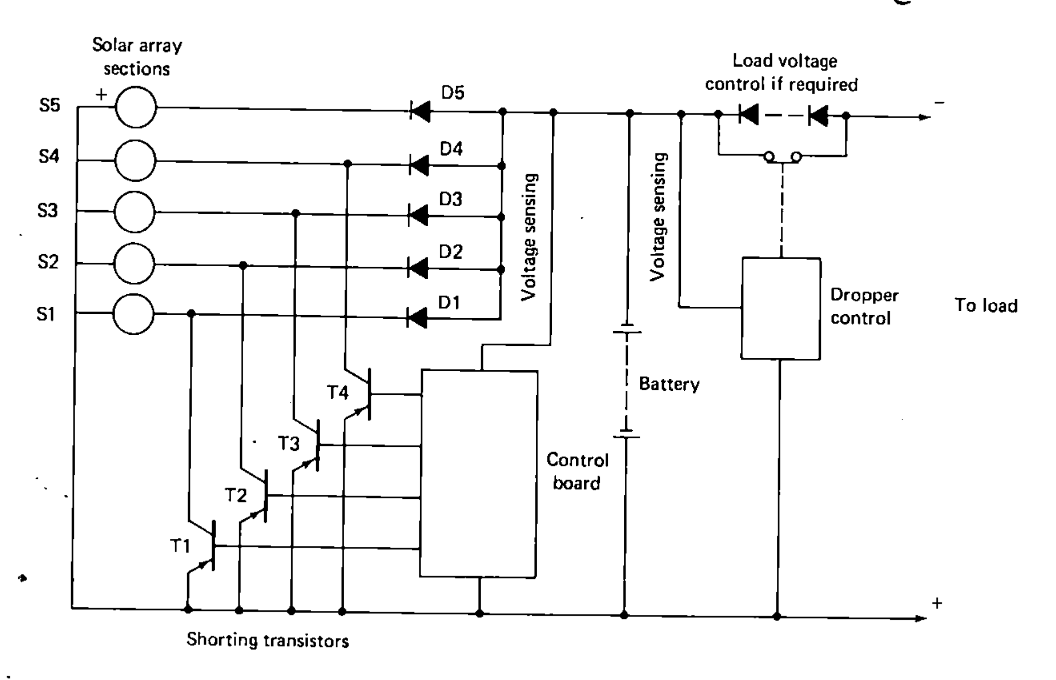
13-4 التحكم في القدرة POWER CONTROL

يربط عادة ثنائي مانع بين النضيدة والمصفوفة الشمسية لمنع تسرب شحنة النضيدة وفقدها خلال المصفوفة في الليل . ويتم طرح الفولتية المستخدمة لانحياز الثنائي المانع من فولتية المصفوفة عند شحن النضيدة . وتقدر الفولتية الهابطة في الثنائيات المانعة من نوع سليكون بحوالي 0.6 الى 0.4 فولت ويمكن ان تخفض الى 0.3 فولت باستعمال ثنائي من نوع شوتكي أو من نوع جرمانيوم .

ولوقاية النضائد من الشحن الزائد هناك حاجة الى استخدام بعض اشكال دوائر التنظيم للفولتية . ويستخدم في المنظومات الصغيرة المنظم المتوازي الخطي (shunt regulator) لتبديد القدرة الفائضة . ويبين الشكل 13.4 واحد من التصاميم الممكنة (مرجع 13.2)لمنظومة بـ 12 فولت وقدرة حوالي 60 واط وبضبط RV1 على مستوى معين اذ يقوم بعده المنظم بقطع الشحنة عن النضيدة . وان هذا المستوى يتحدد عند حوالي 14.1 فولت ، واي زيادة لتيار الشحن عن هذا المستوى تحول الى R_L و TR1 .

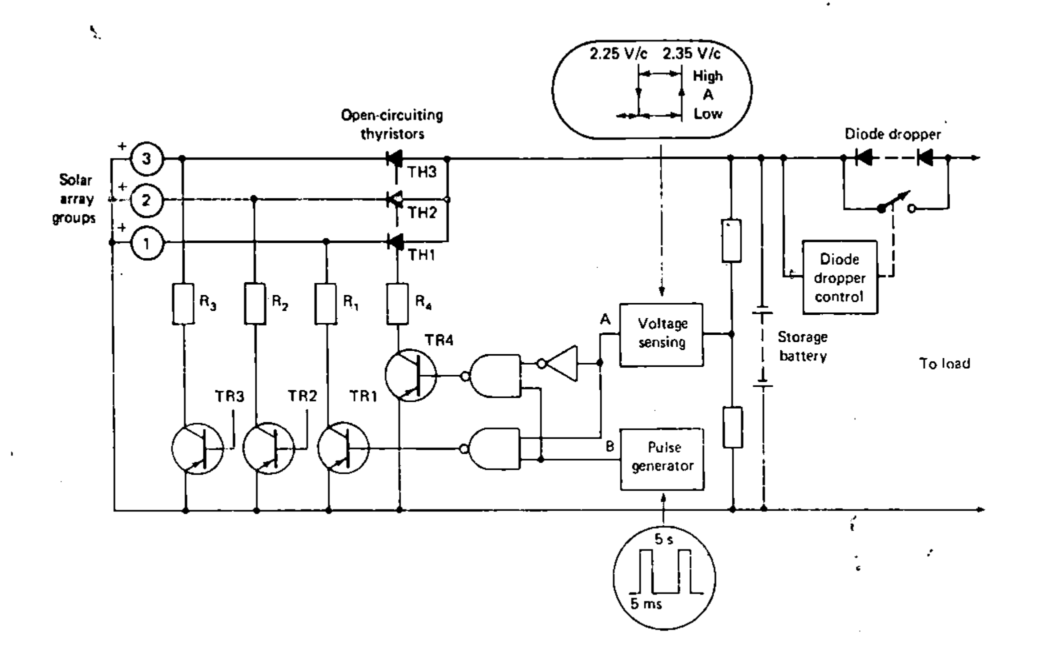
اما في حالة المنظومات الكبيرة فتصبح هذه التقنية غير عملية بسبب الكميات الكبيرة من الحرارة المتولدة . والطريقة المفضلة للمنظومات الكبيرة هي تبديد الطاقة الفائضة كحرارة ضمن الخلايا الشمسية الموزعة . وهذه العملية تتم بأن تجعل جزءاً من الخلايا الشمسية دوائر قصيرة أو دوائر مفتوحة .

ويبين الشكل 13.5 رسماً تخطيطياً لمنظومة من نوع الدوائر القصيرة اذ تقوم الترانسستورات بالتعاقب على جعل المقاطع المتوازية من الالواح دائرة قصيرة للمحافظة على فولتية النضيدة لتبقى عند الحد المطلوب . وبالرغم من ان جعل خلية واحدة دائرة قصيرة ممكناً تماماً ، غير انه عند جعل سلسلة من الخلايا دائرة قصيرة تحدث مشاكل حيث ان الخلية التي تولد تياراً اقل من المعدل من الممكن ان تنحاز عكسياً وتقوم بتبديد القدرة الكلية للوح خلالها كما مر ذكره في الفقرة 6.6.4 . ولم تنجح هذه الطريقة في الحقل ولذا لم تستخدم هذه الطريقة ما لم يتضمن واقيات خاصة في الدائرة مثل ثنائيات التحويل الجانبي (by-pass diodes) مع الالواح المكونة للمصفوفة الشمسية .



الشكل 13.5 التقنية الممكنة لعمل منظم من نوع الدائرة القصيرة لمصفوفات كبيرة ولم ينصح باستخدام هذا النوع من المنظمات ما لم تكن وسائل حماية كادخال ثنائيات القطب الجانبية بين مقاطع المصفوفة .

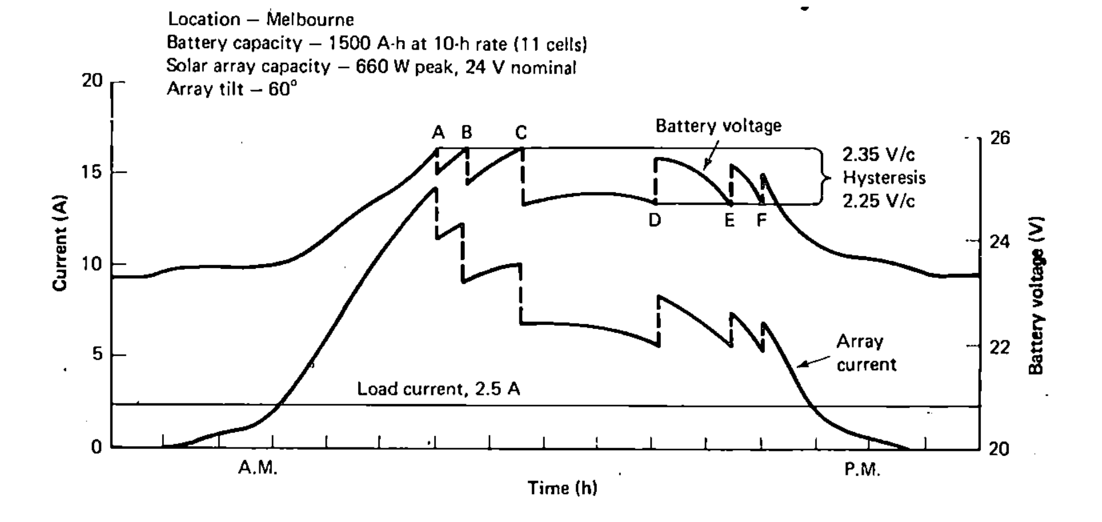
والتقنية البديلة هي تقنية جعل الالواح المتوازية دائرة مفتوحة.والشكل 13.6 يبين واحدة من هذه التقنيات التي تستخدم الثايروستورات . وبأخذ مجموعة **(1)** من المصفوفة الشمسية ، توجه النبضات مباشرة الى قاعدة ترانسستور TR1 أو TR4 معتمدة على فولتية النضيدة . وتوجه النبضات الى TR1 لتجعل TH1 غير موصل وهذا يعني جعل الدائرة مفتوحة لذلك الجزء من المصفوفة . اما النبضات الموجهة الى TR4 فتحول الثايروستور الى حالته الموصلة . وفي هذه الحالة تعمل عمل الثنائي لاعتيادي المانع . ومن الملاحظ تتولد نوع من التخلف المغناطيسي (hysteresis) في دائرة تحسس الفولتية (voltage-sensing circuit) مما يمنع اللااستقرارية ويبين الشكل 13.7 فولتية النضيدة وتيار الدائرة القصيرة اللذين تم الحصول عليهما من هذه المنظومة في احد ايام الصيف عند اقتراب النضيدة من حالة الشحن التام .



الشكل 13.6 نمط المنظم باستخدام الثايروستر لجعل الدائرة مفتوحة (من مرجع 13.2)

13.5 تحديد سعة المنظومة SYSTEM SIZING

لمعرفة سعة المنظومة الشمسية من الضروري توفير معلومات دقيقة عن الحمل المراد تجهيزه وافضل بيانات ممكنة عن الاشعاع الشمسي . ففي حالات محطات تقوية الموجات الدقيقة يكون تحديد الحمل بسيطاً لأنه ثابت تقريباً . وفي تطبيقات اخرى مثل مراكز التلفونات العمومية تزداد الحاجة الى القدرة مع ازدياد المكالمة التلفونية ولذا يكون من الصعب التنبؤ بقيمة الحمل . والحصول على معلومات الاشعاع ، في الاماكن النائية التي تستخدم المنظومات الشمسية المستقلة ، يكون صعباً ، واحسن طريقة لحل هذه المشكلة هي التقدير بالاستقراء البيانات المسجلة من محطات تعمل في اماكن مشابهة . واحسن مصدر للمعلومات ، عند عدم توفر المعلومات الدقيقة ، هو المصدر 13.4 .



الشكل 13.7 خصائص عمل نمط التنظيم الموضح في الشكل 13.6 (من مرجع 13.2)

بدأ مجهزو الخلايا الشمسية ومستخدموها بتطوير برامج في الحاسب الالكتروني لتحديد سعة المنظومة الفوتوفولطائية . وهذه البرامج معقدة اذ تأخذ بعين الاعتبار تأثيرات مثل تغيير اشعة الشمس وتغيير فولتية النضيدة مع درجة الحرارة وكذلك تناقص سعة النضيدة مع درجة الحرارة . ونحاول الان شرح ابسط منظومة بحيث توضح المفاهيم المتضمنة وتكون وافية عند عدم توفر المعلومات الكافية لضمان تصميم اكثر تفصيلاً .

ان الخطوة الاولى في تصميم اي منظومة هي اختيار سعة النضيدة المطلوبة للخزن . سعة الخزن هذه مفيدة لغرضين : اولهما هو خزن كمية كبيرة من الشحنة لتستعمل عند غياب الشمس لفترة طويلة او في حالة حصول عطب في المنظومة وثانيهما هو توفير مخزون موسمي (مرجع 13.3) .

وتعتمد كمية الخزن المطلوبة على عدة عوامل ، احدها المناخ، فالمناطق المشمسة والصحراوية تحتاج الى سعة خزن اقل من المناطق الساحلية المضببة . وتعتبر سهولة الوصول الى مكان النصب لمراقبة المنظومة بانتظام لتجنب المضاعفات عند عطل المنظومة من الامور المهمة ايضاً . واعتيادياً سعة الخزن التي تفي بالغرض لمدة 10 الى 20 أو 30 يوماً كحد اعلى تكون كافية جداً . وعند اختيار النضيدة لمثل هذا الخزن يؤخذ بنظر الاعتبار تأثير درجة الحرارة ومعدل التفريغ على سعة النضيدة .

وبعد اختيار سعة الخزن تبدأ الخطوة الاخرى وهي اختيار عمق التفريغ والوصول اليه عند التقلبات الموسمية الاعتيادية للطاقة الشمسية الساقطة . والتفريغ الزائد عن مستوى المحدد يقلل من عمر نضيدة حامض ـ رصاص كما مر ذكره في الفقرة 13.3.2 . وادنى مستوى للتفريغ هو 50% من السعة المحددة . ومن جهة اخرى فالتصميم لتفريغ الجزئي يزيد من عدد الالواح المطلوبة . فكلما تناقص كلفة الالواح الشمسية اتجه التصميم نحو استخدام التفريغ الجزئي .

وحال اختيار مستوى التفريغ حسب التقلبات الموسمية فمن الممكن حساب السعة الكلية للنضيدة . وبما انه يجب ان تتوفر سعة الخزن الاحتياطي حتى عندما تكون النضيدة في ادنى حالة للشحن بسبب التغيرات الموسمية ، تكون السعة الكلية المطلوبة هي $C_R\ (1 - d)$ حيث d العمق الجزئي للتفريغ المطلوب .

والخطوة التالية ، بعد تحديد سعة النضيدة ، هي اختيار حجم مصفوفة الخلايا الشمسية اللازمة . ويتم تحديد تيار وفولتية اللوح الشمسي بصورة مستقلة عن بعضها . اذ يتم اختيار الفولتية بحيث تكون كبيرة لدرجة تكفي لشحن النضيدة على مدار السنة . ويتم اختيار التيار بحيث يضمن عدم تفريغ النضيدة الى اقل من العمق المحدد لها وفق التغيرات الموسمية .

وبعد هذه الخطوات العملية نحتاج الى البيانات الاشعاعية . وتكون المعلومات عن الاشعاع عادة على شكل اشعاع كلي (global) (R) الساقط على سطح افقي ، واحتمالية وجود الاشعاع المنتشر (D) معه على مثل هذا السطح وعند عدم توفر البيانات الحقلية عن الاشعاع المنتشر فانه من الممكن تقديره بشكل مقبول باستخدام الطريقة المذكورة في مرجع 13.5 . ولتحويل البيانات الاشعاعية المتوفرة

على سطح افقي الى بيانات خاصة بالسطح المائل يجب وضع بعض الفرضيات . والاشعاع المباشر الساقط على سطح مستوي في البيانات اليومية للاشعاع الشمسي يساوي :

$$S = R - D \qquad (13.1)$$

ومن الشكل (a) 13.8 ، يظهر ان المركبة المباشرة على سطح مائل بزاوية β بالنسبة للافق تعطي بـ

$$S_\beta = S \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin \alpha} \qquad (13.2)$$

حيث α هي ارتفاع الشمس عن الافق عند الزوال و تساوي

$$\alpha = 90° - \phi \pm \delta \qquad (13.3)$$

تأخذ الاشارة الموجبة للنصف الشمالي من الكرة الارضية . والاشارة السالبة للنصف الجنوبي . و ϕ هي خط العرض الجغرافي و δ هي زاوية ميلان الشمس (declination angle) وتعطى بـ

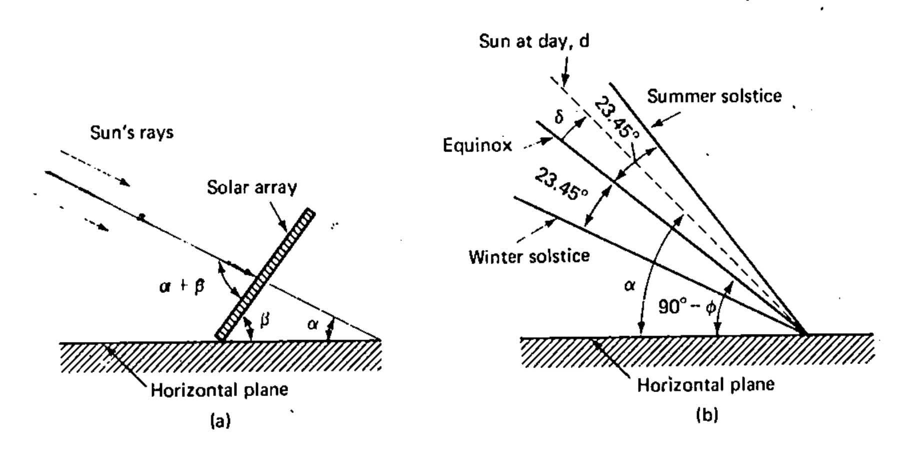
$$\delta = 23.45° \sin\left[\frac{360}{365}(d - 81)\right] \qquad (13.4)$$

حيث d هو عدد الايام من بداية السنة . وبفرض ان الاشعاع المنتشر لايعتمد على زاوية ميلان اللوح ، فان الاشعاع الكلي على اللوح يساوي (مرجع 13.2)

$$R_\beta = S \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin \alpha} + D \qquad (13.5)$$

وتكون المعادلة 13.5 صحيحة عند منتصف النهار فقط ولكنها تساعد على تقدير مقبـول للاشعاع على الـسطح المـائـل باستـخـدام الاشـعاع اليومي على سطح افقي . وتوجد طرائق مفصلة بشكل مسهب تعطي نتائج افضل (مرجع 13.5) .

تتضح طريقة التصميم اكثر من خلال مثال عملي ، حيث نحاول تصميم منظومة فوتوفولطائية لمدينة ميلبورن (Melbourne) في استراليا (خط عرض 37.8 جنوباً) بحيث تستطيع تجهيز 100 واط بصورة مستمرة الى حمل يعمل بـ 24 فولت . d.c



الشكل 13.8 (a) الاشعاع الشمسي عند الظهيرة على مصفوفة مائلة بزاوية β بالنسبة للافق . وزاوية α هي زاوية ارتفاع الشمس (b) العلاقة بين زاوية ارتفاع الشمس α وزاوية الميل (δ) وخط العرض

تم اختيار سعة الخزن لـ 15 يوم لهذه المنظومة . وبما ان الحمل يحتاج الى 100 امبير ـ ساعة / يوم . فان سعة الخزن المطلوبة تساوي 1500 امبير ـ ساعة . وباختيار 25% كعمق للتفريغ حسب التغيرات الموسمية لشدة ضوء الشمس ولاطالة عمر النضيدة يستحسن ان تكون سعة الخزان للمنظومة 2000 امبير ـ ساعة $\left[\frac{\text{1500 أمبير ـ ساعة}}{1-0.25}\right]$ وبمعدل تفريغ 480 ساعة (اي 20 يوم) .

والخطوة التالية في التصميم سي ايجاد حجم المصفوفة الشمسية المطلوبة والذي يضمن عدم تفريغ النضائد الى اقل من مستوى عمق التفريغ 25% . والزاوية المثلى لميل المصفوفة هي زاوية خط العرض زائداً 15 الى 20 درجة ، وليكن الزاوية

للموقع الحالي يساوي 60 درجة . وبعد اختيار هذه الزاوية β, تحول قياسات الاشعاع على سطح مستوى الى قياسات على سطح مائل بهذا الميل وهذه المعلومات لمدينة ميلبورن مدونة في جدول 1-13 وان معدل الاشعاع اليومي على اي مصفوفة عند زاوية 60 درجة مع الافق في مثل هذا الموقع يساوي 21.0 ميكاجول / م٢ . وان اوطأ حد لقابلية اللوح على توليد التيار يمكن ان تقدر بجعل الشحنة الداخلة الى اللوح على مدى ايام السنة مساوية للشحنة المطلوبة للحمل . وهذا يمثل حالة منظومة مثالية بسعة خزن غير محدودة . وفي المثال الحالي ، يحتاج الحمل 100 امبير - ساعة / يوم $(100\ W \div 24\ V \times 24\ h)$ ومعدل شدة الاشعاع اليومي على سطح مائل $21 MJ/m^2$ وبتقسيمها على 3.6 تتحول الى 5.83 كيلو واط – ساعة / م٢ أو 583 مليّ واط – ساعة / يوم . وهذا يمثل 5.83 ساعة من سطوح الشمس عند ذروة السطوح 100 مليّ واط / سم٢ ولذا فان معدل تيار اللوح الشمسي عند شدة اشعاع 100 مليّ واط / سم٢ يساوي على الاقل 17.2 امبير $(20.1 \times 5.83\ h \div 4.26\ h)$ وبأخذ حقيقة ان الشحنة الداخلة الى النضيدة لاتسترد بكاملها اذ تقدر نسبة الشحنة المستردة بـ 95% لنضيدة مشحونة الى نقطة تصاعد الغازات وباحتمال تردي بحدود 10% من الاداء الى نتيجة تأثير تراكم الغبار يزيد من تقدير قيمة التيار من 17.2 الى 20.1 امبير .

ويمكن تقدير الحد الاعلى باعادة الحسابات السابقة نفسها باستخدام اكثر الاشهر سوءاً من الظروف الجوية فاذا تم تصميم المنظومة على هذا النحو فان النضائد تكون قريبة جداً من الشحن التام ماعدا فترات الطقس الرديء . وفي هذا المثال شهر حزيران هو الاكثر سوءا ، والذي يكون فيه الاشعاع الشمسي الساقط على سطح مائل بحدود 4.26 ساعة فقط وهذا يعطي الحد الاعلى بـ 27.5 امبير

ان التيار الذروي المقدر للمصفوفة المثالية يقع بين هذين الحدين ويمكن ايجاده بطريقة حساب الخطأ والصواب والتي تتضمن تدقيق حالة النضيدة من الشحن على طول السنة . وفي المثال الحالي ، يقدر التيار الذروي للمصفوفة بـ 25 أمبير . وتوليد التيار لكل ساعة واستهلاك التيار لكل ساعة وحالة النضيدة من الشحن كدالة للزمن على طول السنة مبينة في جدول 13.1 . علماً ان شحنة النضيدة تبقى اعلى بـ 75% من السعة المحددة للنضيدة وعلى طول السنة . واذا هبطت الى اقل من هذه القيمة فيجب زيادة حجم المصفوفة . ولو ان النتائج الحسابية لكل اشهر السنة مبينة في جدول 13.1 غير ان الاشهر التي يكون فيها الاشعاع الشهري اقل من المعدل المطلوب فقط قد تأخذ بنظر الاعتبار . وتشير الحسابات الى ان كمية كبيرة من القدرة تتبدد في الصيف بهذه الطريقة من التصميم . ويبين الشكل 13.9

جدول 13.1 معلومات لتصميم المنظومة الفوتوفولطائية المستقلة

System Data

Site:	Melbourne, latitude 37.8°S
Load:	100 W, 24 V
Array inclination:	60° to horizontal
Battery capacity:	2000 A-h
Peak array current rating:	25 A

Month	*Average daily radiation (mWh/cm^2)*			*Monthly ampere hours*			*Battery state*		
	Global (R)	*Diffuse (D)*	*On array**	*Array†*	*Load‡*	*Difference*	*Start*	*Finish*	*% full charge*
Jan.	839	210	688	4559	3147	1412	2000	2000	100
Feb.	708	149	648	3878	2842	1036	2000	2000	100
Mar.	562	166	609	4035	3147	888	2000	2000	100
Apr.	436	127	575	3687	3045	642	2000	2000	100
May	297	98	463	3068	3147	-79	2000	1921	96
June	246	79	426	2732	3045	-313	1921	1608	80
July	277	82	462	3061	3147	-86	1608	1522	76
Aug.	374	120	520	3446	3147	299	1522	1821	91
Sept.	516	148	596	3822	3045	777	1821	2000	100
Oct.	697	197	673	4459	3147	1312	2000	2000	100
Nov.	732	241	627	4021	3045	976	2000	2000	100
Dec.	890	214	701	4645	3147	1498	2000	2000	100

*Calculated using Eq. (13.5).
†Calculated as:

Peak current rating × days in month × average daily radiation × charge efficiency × dirt accumulation factor/100 mW/cm^2

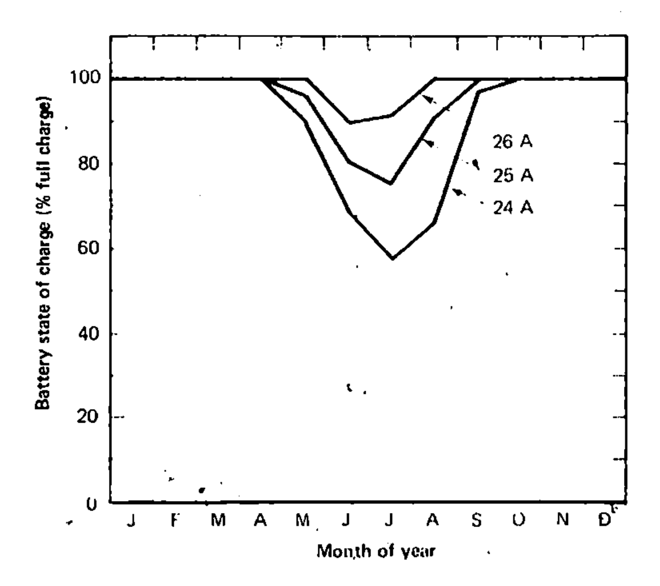
‡Including 3% discharge of peak battery capacity per 30-day month.
Source: Adapted from Ref. 13.2.

حالة شحن النضيدة كدالة للزمن خلال السنة ولتيارات مختلفة للمصفوفة ويظهر بوضوح تأثير زيادة صغيرة في حجم المصفوفة ، فزيادة 4% في حجم المصفوفات على سبيل المثال تبقى النضيدة في حالة شحن اعلى خلال السنة فيما لو اريد رفع سعة الخزن الى الضعف .

ولتكملة تقدير حجم المنظومة يجب تحديد فولتية المصفوفة ولتطبيق التصميم المذكور بشكل جيد يجب ان تكون المنظومة قادرة على تجهيز القدرة الذروية حتى عند اعلى درجة حرارة محتملة اثناء العمل اليومي والشحن التام للنضائد (اي 2.35 فولت لكل خلية) . فبالنسبة للتصميم المثالي الحالي يجب ان تكون المنظومة قادرة على تجهيز 25 أمبير عند فولتية 29 فولت (اي 12 × 2.35 + 0.8 فولت للثنائي المانع) عند درجة حرارته القصوى المحتملة 60 درجة مئوية . ولذلك يجب ان يكون للمصفوفة معدل ذروي 725 واط عند درجة 60 مئوية وبما ان قدرة المصفوفة تهبط بحوالي 0.5% لكل درجة مئوية واحدة فان القدرة الذروية المقدرة تساوي 879 واط عند درجة الحرارة الاعتيادية25مئويةوكثافة القدرة الساقطة 100 ملّي واط/ سم٢ .
وفي جميع الاحوال ، فهذه التصميم من النوع المحافظ (conservative system) اذان كميات كبيرة من القدرة تهدر خلال الصيف . ويتبين من البيانات المناخية لمدينة ميلبورن انه خلال الاشهر الباردة عندما يكون نتاج اللوح الشمسي حرجاً ، فمن غير المحتمل ان تصل درجة حرارة المحيط الى اكثر من 10 مْ . واما بالنسبة للتصاميم الاعتيادية للالواح فمن غير المحتمل ان تصل درجة حرارة الخلية الى اكثر من 44 مْ خلال هذه الاشهر . فاذا تم تحديد فولتية المصفوفة بـ 29 فولت عند درجة الحرارة هذه فان المصفوفة ستجهز القدرة المطلوبة خلال اشهر الشتاء . اما حصيلتها خلال اشهر الصيف فتكون اقل من المطلوب على الرغم من انها غير مهمة قياساً الى القدرة الكبيرة المتولدة خلال هذه الاشهر .

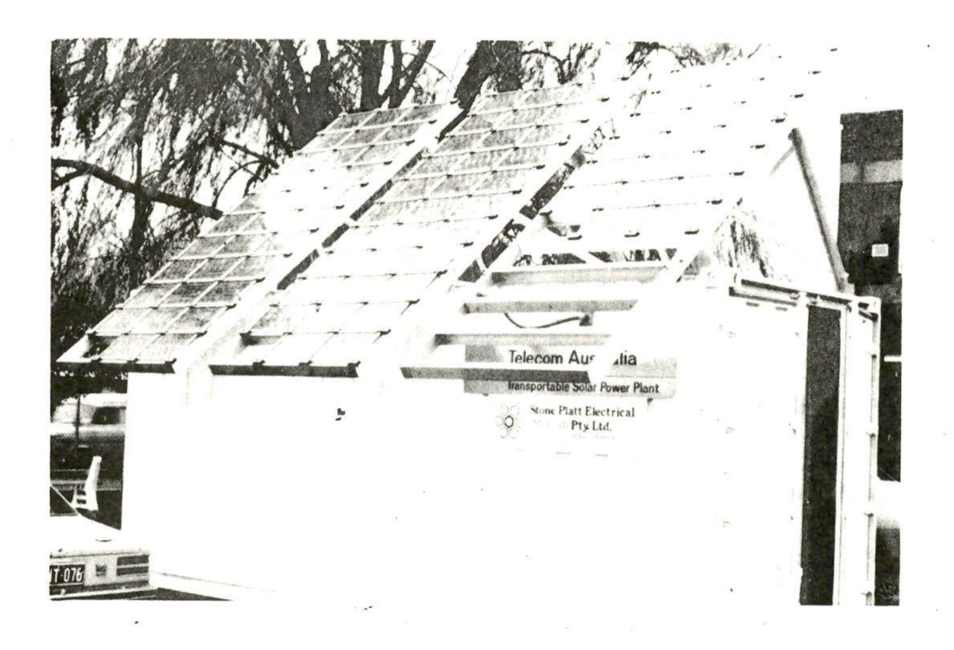
ويصل شحن النضيدة الى حالته الدنيا في تموز ، حيث ان معدل درجة الحرارة في مدينة ميلبورن هو حوالي 10 مْ . بفرض ان النضيدة تعمل عند درجة حرارة المحيط ، فيتطلب زيادة في سعه الخزن لتلبي الحاجة في هذا الشهر من الشحنة المخزونة . واذا فرضنا ان السعة تقل بمقدار 10% عند درجة الحرارة هذه فاننا نحتاج الى زيادة السعة المطلوبة الى 2222 امبير ـ ساعة عند درجة حرارة الغرفة ومعدل تفريغ 480 ساعة . وربما يحتاج اللوح الشمسي ومنظومة الخزن الى تحوير ليكون مناسباً للوحدات التجارية . ان المناطق المشمسة اكثر من العالم تحتاج الى مصفوفات شمسية اصغر لتجهيز الحمل نفسه بالقدرة . وعلى سبيل المثال ، تحتاج بعض المناطق في استراليا الى منظومة بحجم ثلثي الحجم المقدر لمدينة ميلبورن

لتجهيز الحمل نفسه (مرجع 13.2) . ويبين الشكل (13.10) صورة فوتوغرافية لمحطة طاقة شمسية مصممة لتجهيز القدرة الى حمل بهذا الحجم ، حيث تستخدم الحاوية لتثبيت الالواح الشمسية اضافة الى عملها كمستودع لخزن النضائد والسيطرة الالكترونية وحاجة رجال الصيانة واخيراً يمكن تلخيص خطوات لتصميم بالنقاط الاتية



الشكل 13.9 حالة النضيدة من حيث الشحن للمثال التصميمي المذكور في متن الكتاب ولثلاث مصفوفات باحجام مختلفة

١ ـ ايجاد معلومات كافية عن الحمل المراد تجهيزه بالقدرة .
٢ ـ اختيار حجم النضيدة بالاعتماد على خط العرض للموقع والتقلبات المناخية المحلية .
٣ ـ اختيار زاوية ميل المصفوفة الشمسية .
٤ ـ تقدير الحد الادنى والأعلى لحجم المصفوفة من المعدل وأدنى قيمة للأشعاع الشهري الساقط على المصفوفة المائلة بزاوية الميل المختارة .
٥ ـ ايجاد الحجم المثالي للمصفوفة للحفاظ على اعلى نسبة للشحن المحددة للنضيدة على طول السنة .
٦ ـ تغيير زاوية الميلان للمصفوفة لايجاد الزاوية المثلى لاستلام الطاقة الشمسية .



الشكل 13.10 منظومة القدرة الفوتوفولطائية التي تم تصميمها لتجهيز 100 الى 150 واط من القدرة تقريباً وبصورة مستمرة لمحطات تقوية الموجات الدقيقة وتستخدم الحاوية لتثبت الالواح الشمسية وحاويات نضائد الخزن والكترونيات السيطرة وكذلك اجهزة الصيانة .

٧ – تعيين فولتية المصفوفة عند اعلى درجة حرارة للمستوى المرغوب لتجهيز تيار الحمل الكلي .

13.6 ضخ المياه WATER PUMPING

ضخ المياه بكميات صغيرة هو احد التطبيقات الملائمة لاستخدام المنظومات الفوتوفولطائية وذلك لسببين ، الاول ، امكانية ربط المصفوفة الشمسية الى مضخة الماء مباشرة دون الحاجة الى اجهزة التكييف الوسطية أو نضائد خزن مكونة بذلك تركيباً بسيطاً جداً قابل للنقل وسهل الصيانة . والثاني ان الحاجة لضخ المياه تتناقص في الفترات التي تكون فيها طاقة الشمس قليلة في كثير من التطبيقات . وهذا يساعد على اختيار حجم مناسب من الناحية الاقتصادية . والخزن بطريقة ضخ المياه الى مناطق عالية تعتبر افضل طريقة .

ومن المجالات المهمة لاستعمال وحدات ضخ المياه الصغيرة بالطاقة الشمسية خاصة لاغراض الري هو الاقطار النامية (مرجع 13.6) . والري بهذه الطريقة

يساعد على استغلال الاراضي اليابسة حيث يرجع ذلك بفوائد كبيرة . والري بمساحات صغيرة (Microirregation) جداً ($\sim 250 W_p$) ملائم بصورة جيدة لاستغلال الاراضي الزراعية من قبل صغار الملاكين . وبما انه من غير المحتمل قدره لهؤلاء الملاكين دفع راس المال المطلوب فهناك محاولات للتشجيع على ادخال مثل هذه الوحدات ضمن برامج المساعدت التنمية (مرجع 13.6) . وهذه الطريقة مفيدة لغرضين الاول ، هو زيادة مصادر المواد الغذائية لهذه الاقطار ، والثاني ، توفير سوق جيد للخلايا الشمسية . وهذا بدوره يساعد على تطوير تقنيات الخلية الشمسية .

13.7 الخلاصة SUMMARY

تعتبر ادامة النضائد ، مبدئياً ، مشكلة اساسية في المنظومات الفوتوفولطائية المستقلة حيث تحتاج الى تعبئة كاملة بالمحلول الاليكتروليتي سنوياً أو شبه سنوي . ومن جهة ثانية ، يجب تصميم المنظومة بعناية ودقة كبيرة لتعطي اطول عمر للنضيدة .ويجب التأكد من عدم حصول الشحن الزائد لنضائد الرصاص - الحامضية والهبوط الزائد لفترات طويلة كذلك .

ان الانخفاض المستمر في احتياجيات القدرة من اجهزة الاتصالات الالكترونية وكذلك في اسعار الخلايا الشمسية جعل الاتصالات السلكية من اهم الاسواق التجارية لاستخدامات الخلايا الشمسية . اخذت المنظومات المستقلة المشابهة الى تلك الموضحة في هذا الفصل تستخدم في محطات تقوية الموجات الدقيقة ، وفي بعض الاجهزة الخاصة بالملاحة البحرية ومحطات الأرصاد الجوي والوقاية من التآكل الكيمياوي .

تستخدم مع المنظومات المستقلة عادة نضائد ذات سعات خزن كبيرة وذلك لخزن حاجة المنظومة العالية من الطاقة . يتم اختيار حجم المصفوفة الشمسية بحيث يضمن احتفاظ هذه النضائد بنسبة مقبولة من شحنته التامة عند اشهر الشتاء . ولاتستطيع هذه المنظومة الفوتوفولطائية المصممة على هذا النمط تزويدنا بالقدرة القصوى على مدار السنة . وفي كثير من التصاميم المثالية للمنظومات المستقلة يكون معدل القدرة الذروية للمصفوفة الشمسية حوالي خمس مرات متوسط القدرة الخارجة من المنظومة . وفي المواقع الحرجة تزيد هذه النسبة مرتين أو اكثر

تمارين

13.1· في المثال التصميمي المبين في جدول 13.1 قارن التغير الدوري اليومي في حالة النضيدة من حيث الشحن مع التغير الفصلي .

13.2· في محل واقع عند خط العرض 34^0 شمالاً . أوجد زاوية ميل المصفوفة الشمسية التي تعطي اقصى نتاج للمنظومة في شهر تشرين الثاني ، مستخدماً الطريقة التقريبية الموضحة في متن الكتاب . علماً ان معدل الاشعاع الكلي في هذا الموقع على سطح مستوي في شهر تشرين الثاني هو 12 ميكاجول/ م٢/ يوم . والقيمة المصاحبة من الأشعاع الانتشاري هي 4.1 ميكاجول/ م٢/ يوم .

13.3· صمم منظومة فوتوفولطائية مستقلة في موقع عند خط العرض 23^0 شمالاً ، لغرض تجهيز حمل 250 واط بفولتية 48 فولت (d.c) . ابتداءً من شهر كانون الثاني ، فان الاشعاع الكلي الساقط على سطح مستوي في 12 شهر على التوالي هو (القيم الموجودة داخل الاقواس تمثل الاشعاع الانتشاري) : (3.2) 15.5 و (4.2) 17.2 و (4.0)21.6 و (6.0) 23.3 و (7.0) 24.9 و (8.8) 24.1 و (8.9) 23.8 و (8.1) 22.9 و (7.3) 20.7 و (4.8) 18.9 و (4.7) 15.6 و (3.8) 15.5 ميكاجول/ م٢/ يوم .

REFERENCES

المراجع

[13.1] *Handbook for Battery Energy Storage in Photovoltaic Power Systems*, Final Report, DOE Contract No. DE-AC03-78ET 26902, November 1979.

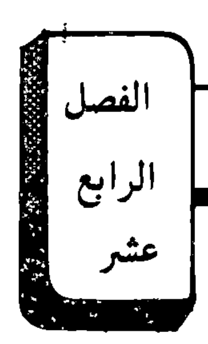
[13.2] M. Mack, "Solar Power for Telecommunications," *Telecommunication Journal of Australia 29*, No. 1 (1979), 20–44.

[13.3] *Solar Electric Generator Systems: Principles of Operation and Design Concepts*, booklet prepared by Solar Power Corporation.

[13.4] G. O. G. Löf, J. A. Duffie, and C. O. Smith, *World Distribution of Solar Radiation*, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Report No. 21, July 1966.

[13.5] S. A. Klein, "Calculation of Monthly Average Insolation on Tilted Surfaces," *Solar Energy 19* (1977), 325–329.

[13.6] D. V. Smith and S. V. Allison, *Micro Irrigation with Photovoltaics*, MIT Energy Laboratory Report, MIT-EL-78-006, April 1978.



منظومة القدرة الفوتوفولطائية المركزية والسكنية

RESIDENTAL AND CENTRALIZED PHOTOPHOLTAIC POWER SYSTEM

14.1 المقدمة INTRODUCTION

في هذا الفصل الاخير من هذا الكتاب نلقي الضوء على بعض المنظومات الفوفولطائية التي تحتمل استخدامها في تطبيقات طويلة الامد . وهناك في الحقيقة مجالين تستطيع المنظومات الفوتوفولطائية من خلالها ان تسهم بشكل فعال في سد حاجات العالم من الطاقة الاول استخدامها في تزويد الوحدات السكنية بالقدرة الكهربائية والثاني استخدامها في محطات القدرة المركزية (power plants centrlized) . وبسبب الحاجة اعداد هائلة من الخلايا الشمسية لسد حاجة القدرة المطلوبة ولمحدودية انتشار التقنيات التصنعيـة تجارياً .لايتوقع ان تكون اسهام هذا النوع من الطاقة اكثر من جزء بالمائة من القدرة الكليـة قبل نهاية القرن الحالي . الا ان هذا لايعني انه لن يكون هناك منظومات عملية اقتصادية تعمل قبل هذا التاريخ .

ويتبين من التحليلات الاقتصادية لانتاج الخلايا الشمسية على نطاق واسع ان التقنيات السليكونية المتقدمة التي تم وصفها في الفصل السابع تستطيع انتاج الواحاً شمسيـة باسعار مناسبة لتجهز القدرة للاغراض السكنية . والحاجة لانخفاض اسعار الالواح الشمسية لغرض استخداماتها في المحطات المركزية بصورة اقتصادية اشد مما هي عليه في المنظومات الصغيرة . وقد لاحظنا في الفصل العاشر ان نبائط الاغشية الرقيقة الفوتوفولطائية هي الامل الاحسن للحصول على انخفاض كبير في كلفة اللوح الشمسي .

14.2 المنظومات السكنية RESIDENTAIL SYSTEMS

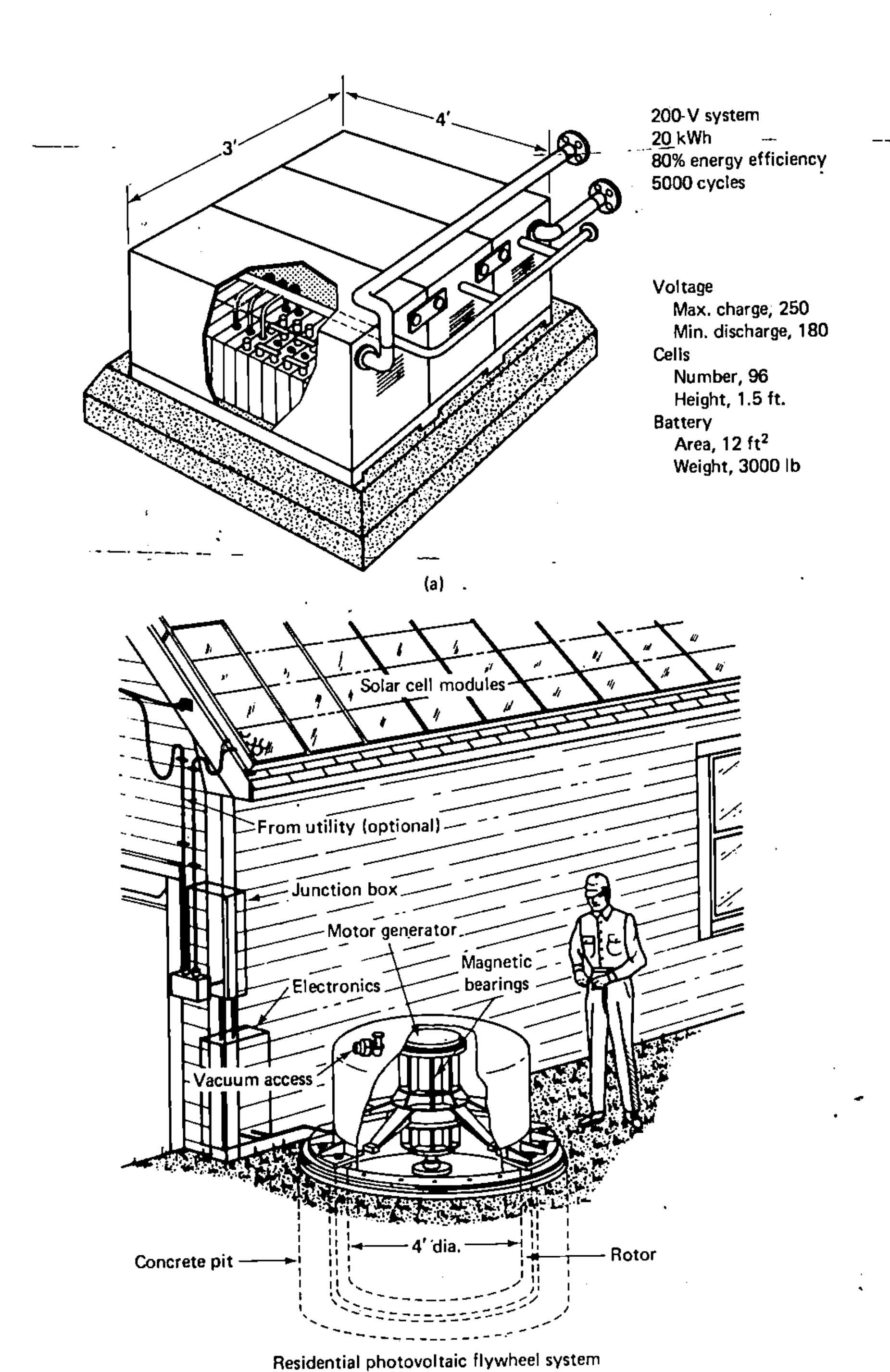
14.2.1 خيارات الخزن Storage Options

وصفت في الفصل الثالث عشر المنظومات الفوتوفولطائية على شكل منظومات مستقلة للاماكن النائية وعلى الرغم من جاذبية استخدام المنظومة الفوتوفولطائية بصورة مستقلة عن الشبكة الكهربائية الا انها غير اقتصادية في غير المواقع التي لاتتوفر فيها هذه الشبكة . فهنالك حاجة الى تقليل كلفة خزن الطاقة على مقياس صغير ويمكن تحقيق ذلك باستخدام نضائد اكسدة/ اختزال التي مر ذكرها في الفصل الثاني عشر .

من الوسائل الرخيصة للتخلص من منظومة الخزن هي ربط المنظومة الفوتوفولطائية بالشبكة الكهربائية حيث يزيل هذا الحاجة الى خزن الطاقة لفترة طويلة . وهناك منظومات مختلفة في هذا المجال وكل هذه المنظومات تشتمل على محول (inverter) لتحويل تيار الخلية المستمرة الى تيار متناوب (a.c inverter / d.c)

ولو انه من الممكن استخدام الشبكة الكهربائية بدلاً من الخزن طويل الامد الا ان السؤال يبقى دائماً فيما اذا كان الخزن القصير الامد مرغوباً في الموقع المراد بناء المنظومة ام لا وهذا النوع من الخزن يساعد المنظومة الفوتوفولطائية خلال الليل او خلال فترات قصيرة من الطقس الرديء . اما بالنسبة للفترات الطويلة من الطقس الرديء فتقوم الشبكة الكهربائية بتجهيز القدرة الى الوحدات السكنية من القدرة المتوفرة فيها . ويمكن ان تعمل المنظومة الفوتوفولطائية بدون خزن موضعي ولاسيما اذا كان بالامكان بيع الطاقة الفائضة الى الشبكة وعندئذ يزداد الحجم المثالي للمنظومة للحصول على عائد اكبر من الطاقة الفائضة .

ومن وجهة نظر ساكني الوحدات السكنية فان المنظومة المثالية تعتمد على الكلفة النسبية للالواح الشمسية ومنظومة الخزن وعلى اسس التسعيرة لتجهيز الطاقة . ان الاختلاف الكبير في التسعيرة واعتمادها على ساعات النهار يشجع على زيادة الخزن بينما وجود رغبة المجهز في شراء الطاقة الفائضة باسعار مناسبة يشجع على تقليل سعة الخزن المثالي لدى الوحدات السكنية . وتعتبر النضائد الكيميائية احسن وسيلة لخزن الطاقة ومن اهم مساوىء هذه النضائد خطورتها في المواقع السكنية والمشاكل المرتبطة بادامتها المنتظمة ومع وجود التهوية المناسبة والوقاية الالكترونية تصبح هذه الطريقة من الخزن مناسبة (مرجع 14.1) . والشكل 14.1(a) يبين نموذجا لمنظومة من النضائد الكيميائية ومنظومة اكسدة/



الشكل 14.1 مبادىء خزن الطاقة للمنظومات السكنية

(a) الشكل الممكن للنضيدة (من مراجع 14.1) (b) الخزن بدولاب الدوار (من مرجع 14.2)

اختزال التي تم وصفها في الفصل الثاني عشر لها مميزات عديدة اذا تم تطويرها بشكل جيد. وقد اخذ بنظر الاعتبار الخزن بطريقة الدولاب الدوار كذلك (مرجع 14.2) . والشكل (14.1(b يبين حجم الوحدة المطلوبة لمثل هذه المنظومة .

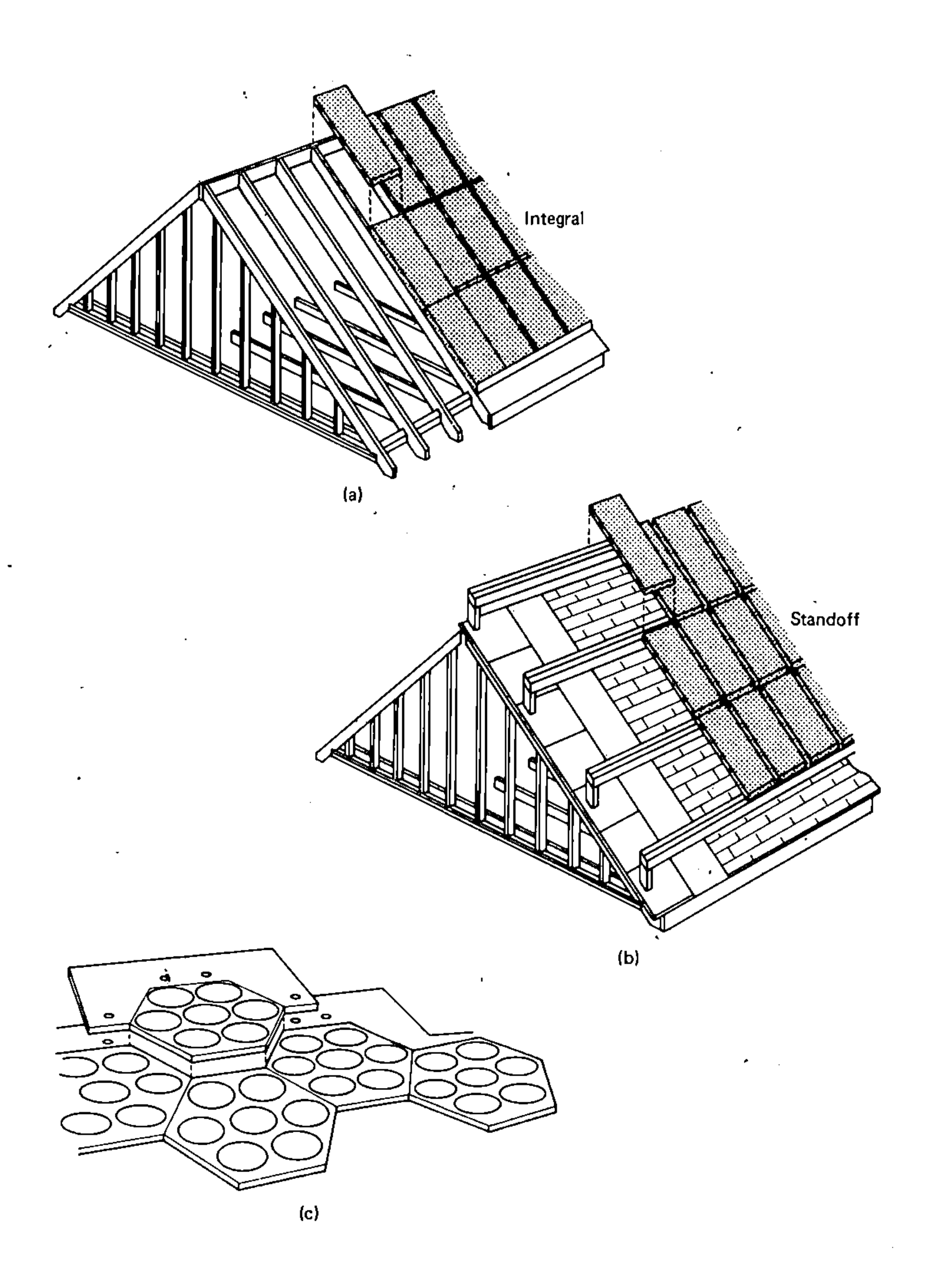
14.2.2 تثبيت اللوح الشمسي Module Mounting

تشير الدراسات الى ان ابسط طريقة لتثبيت الالواح الشمسية هو من خلال استخدامها على هيئة سقوف منزلية كما مبين في الشكل (b) 14.2 حيث تقوم بوظيفتين معاً هما التجهيز بالكهرباء والوقاية من الظروف الجوية (مرجع 14.3) ومن الممكن ترتيب الالواح على هيئات متحركة كما موضح في الشكل (b) 14.2 . وعلى الرغم من ان نفقات التركيب تكون متقاربة في كلا الحالتين الا ان هناك ميلاً نحو استخدام الالواح الشمسية في الوحدات السكنية كسقوف ثابتة لتحل محل السقف العادي . ويقدر الحجم المثالي للوح الشمسي لهذا التطبيق بحدود 0.8 × 2.5 متر وبوزن حوالي 25 كغم . وكلفة شبكة الاسلاك الموصلة تتناقص مع تزايد الفولتية الخارجة من المنظومة ، لكنها لاتتأثر بشدة بالنسبة للفولتيات التي تزيد على 100 فولت dc (مرجع 14.3) . وهذا المرجع يبين ان الاعتبارات الجمالية تفضل عادة استخدام الالواح المستطيلة ذات اللون الترابي الغامق غير اللامع . والالواح الجملونية (shingle) [الشكل (14.2(c] قد تكون جذابة ايضاً اذا امكن تطوير طريقة رخيصة لربط بعضها ببعض (مرجع 14.4) .

14.2.3 توليد الحرارة Thermal Generation

يستخدم جزء كبير من الطاقة في الوحدات السكنية عادة على شكل الحرارة لغرض التدفئة وتسخين المياه . والسؤال هنا ماهي احسن طريقة لتجهيز الحرارة من المنظومات الفوتوفولطائية . وهناك ثلاث طرائق مختلفة : اولاً استخدام نتاج الالواح الشمسية لتزويد كل المتطلبات الكهربائية والحرارية للوحدة السكنية ثانياً : استخدام سخانات شمسية لتزويد المسكن بالحرارة . ثالثاً : منظومة الطاقة الكلية والتي تتركب من فوتوفولطائية/ حرارية لتزويد المسكن بالحرارة والكهرباء معاً .

بالرغم من جاذبية منظومة الطاقة الكلية (اي فوتوفولطائية/ حرارية) لها مساوىء عديدة من الخلايا الشمسية المستخدمة في هذه المنظومة تكون عادة في درجات حرارة عالية وهذا يعني انها تعمل بكفاءة اوطأ كما ان السخان الحراري ايضاً يشتغل بكفاءة واطئة لان الخلايا الشمسية تستخلص قسماً من الطاقة المتوفرة في السخان او النسبة بين الطاقة الكهربائية والطاقة الحرارية المتولدة عموماً



الشكل 14.2 الهيئات الممكنة لتثبيت الواح من الخلايا الشمسية على السطح
(a) المتصل (مرجع 14.3)
(b) المتحرك (مرجع 14.3)
(c) جلوني (shingle) الشكل

لاتكون بالقدر الذي تحتاجه الوحدة السكنية . ولقد تبين من الدراسات ان منظومة الطاقة الكلية للوحدات السكنية نادراً ماتكون اقتصادية من حيث الكلفة مقارنة بالمنظومات الفوتوفولطائية والحرارية ذات المساحة المثالية كل واحدة منها على حدة (مرجع 14.5)

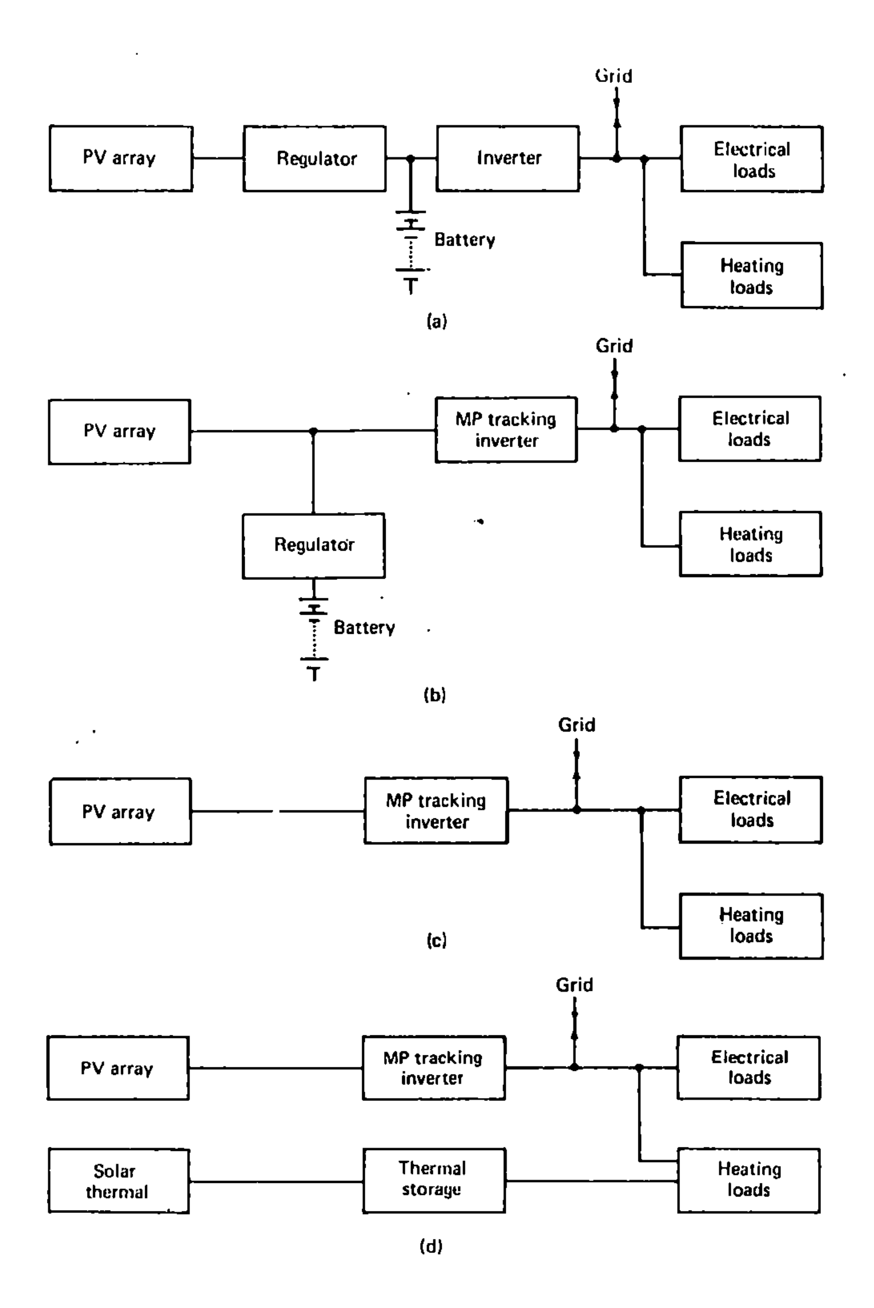
ان الاختيار بين هذه المنظومة ومنظومة فوتوفولطائية المطلقة تعتمد فيما اذا كانت سهولة الاخيرة تتغلب على مشكلة الكفاءة الذاتية الواطئة لتحويل الطاقة الشمسية الى الكهرباء ومن ثم الى الحرارة . فاذا كانت الكلفة للالواح الشمسية واطئة تكون هذه الطريقة هي المرغوبة .

14.2.4 اشكال المنظومات System Configuration

يبين الشكل 14.3 عدة هيئات محتملة للمنظومات الفوتوفولطائية يستخدم في الاولى كما في الشكل 14.3(a) نضيدة خزن . ترتبط بمنظم (لحفظ النضيدة من الشحن الزائد) حيث يربط المنظم بين اللوح الشمسي والنضيدة . في هذا الربط تكون الفولتية الداخلية للمحلول هي فولتية النضيدة . ويبين الشكل 14.3(b) هيئة اكثر كفاءة حيث يستخدم جزء من الفولتية الناتجة لشحن النضيدة خلال المنظم المتوازي . ويبين الشكل 14.3(c) منظومة فوتوفولطائية بدون نضيدة خزن اذ يتم الوصل مباشرة بين اللوح الشمسي والمحول . ويمكن ان تصمم المنظومة بالشكل الذي يضمن الحصول على القدرة القصوى من اللوح . واخيراً يبين الشكل 14.3(d) كيفية ربط السخان الحراري مع المنظومة السابقة . وفي كل من هذه الحالات فان النتاج المتناوب من المحول يجب ان يتزامن مع فولتية الشبكة .

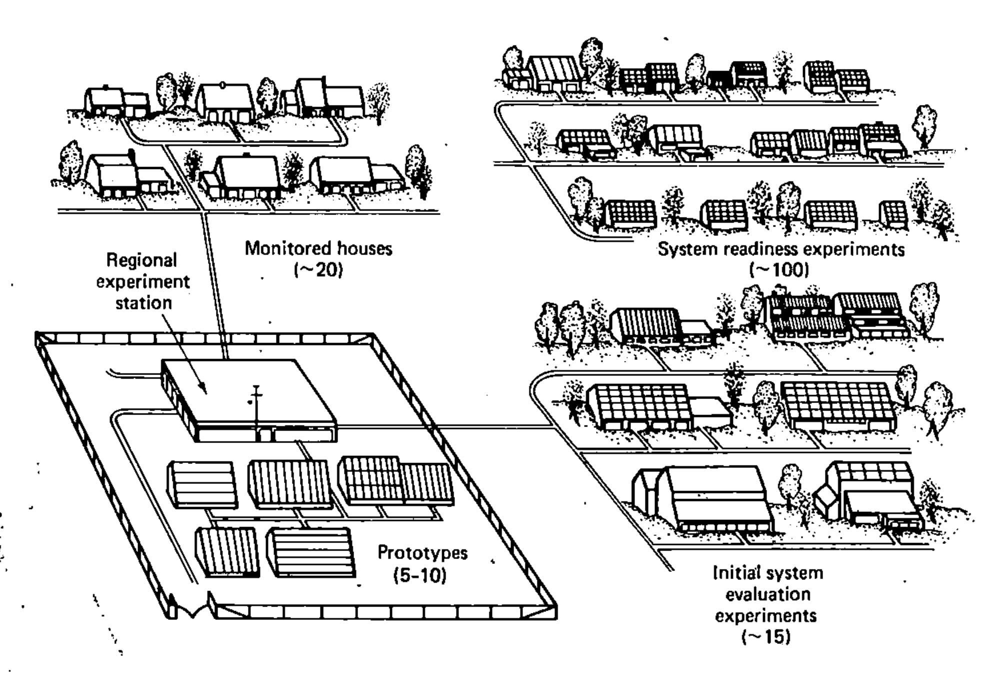
14.2.5 برنامج توضيحي Demonstration Program

في نهاية عام 1979 باشرة دائرة الطاقة الامريكية بشروع فوتوفولطائي لغرض الاسكان . وكان الهدف من المشروع هو توضيح المسائل الخاصة باستخدام المنظومة الفوتوفولطائية في المناطق المرتبطة بالشبكة الكهربائية وبيان مدى صلاحية هذه المنظومات تجاريا . وفقاً للخطوط العريضة الاصلية الموضوعة للمشروع (مرجع 14.6) كان يجب ان يتم المشروع في عام 1988 ويتضمن المشروع ثلاثة مراحل رئيسة كما موضح في الشكل (14.4) .
تتضمن المرحلة الاولى من المشروع بناء محطات تجريبية اقليمية في مناطق مختارة من الولايات المتحدة والغاية من هذه المحطات اختبار النماذج الاولية من المنظومات التي تم تصميمها وتنفيذها من قبل القطاع الصناعي . هذه المنظومات في الحقيقة



الشكل 14.3 نمط التوصيل بين عناصر منظومة فرتوفولطائية خاصة بوحدات سكنية . راجع متن الكتاب للتفاصيل .

من النوع الذي ينصب على السطح فقط ويزود حاجة السكان من القدرة الكهربائية والحرارية وتراقب المتطلبات الحقيقية من الطاقة الحرارية والكهربائية بدقة للوحدات السكنية القريبة من المحطات التجريبية وفي نفس الوقت لغرض دراسة اداء هذه المنظومات التجريبية واجراء المقارنات .



الشكل 14.4 شكل توضيحي لبرنامج اسكان DOE حيث يتراوح من منظومة ابتدائية لغرض الاختبار ولتجارب الاقليمية الى استخدام الخلايا الشمسية لتجهيز القدرة لعدد كبير من وحدات السكنية الخاصة التجارية .

اما في المرحلة التالية فيتم اختيار المنظومات الناجحة واختبار التحسينات التي جرت عليها في وحدات سكنية قليلة مشغولة بالقرب من المحطات التجريبية والفحوصات على هذه التجارب الابتدائية حول هذه المنظومات لم يقتصر على الاداء الهندسي للمنظومة فحسب بل يتعلق باستجابة وردود فعل السكان والمؤسسات الانشائية .

وفي المرحلة الاخيرة التي كان مقدراً لها تبدأ عام 1984 يتم اجراء تجارب نصب منظومة سكنية مستقلة من المحطات التجارب الاقليمية . وفي هذه المرحلة يتم تشييد مجاميع سكنية بحدود 100 وحدة سكنية لتجهز بالقدرة الكهربائية باستخدام منظومة فوتوفولطائية وذلك لمواجهة المشاكل الانشائية والهندسية التي قد

تظهر من الاستخدامات الواسعة للمنظومة الفوتوفولطائية في القطاع الاسكاني مباشرة (مرجع 14.7).

14-3 محطات القدرة المركزية CENTRAL POWER PLANTS

14.3.1 الاعتبارات العامة General Consideration

الغاية النهائية للمنظومة الفوتوفولطائية من الناحية الاقتصادية منافسة الوسائل التقليدية الاخرى لتوليد كميات كبيرة من الكهرباء من محطات القدرة المركزية . وتشير عدة دراسات الى بعض الخصائص المهمة التي تساعد على تحقيق ذلك . والشرط الرئيس لتحقيق ذلك هو ان تكون كلفة الالواح الشمسية واطئة اي تكلف اقل من قيمتها من الاستخدامات السكنية . والشرط الاخر الذي تقل اهميته عن الشرط الاول هو ان اللوح يجب ان يكون كفوءاً . اي يفضل استخدام مصفوفات شمسية بكفاءة بحدود 10% على الاقل وبسبب الطبيعة الانتشارية للاشعاع الشمسي لابد من الحاجة الى مساحات سطحية واسعة من الارض لتوليد الطاقة المطلوبة من المنظومات الفوتوفولطائية . ولقد اعطيت بعض الاهمية لمعرفة النسبة المئوية للمساحة الارضية المغطاة بالخلايا الشمسية اللازمة لتوليد القدرة الكهربائية الكلية في بعض الاقطار المختارة . والنتائج الحسابية لهذه الاقطار مبينة في الجدول 14.1 . وعلى الرغم من ان نتائج بعض الدول الاوربية غير جيدة لاسباب معروفة ، فان في دول عديدة مثل الولايات المتحدة مثلاً نجد ان المساحة الارضية اللازمة اقل بكثير من السطح المغطى حالياً بانشاءات اخرى مثل الابنية والطرق .

وعلى الرغم من ضخامة العمل فان امكانية نصب المنظومات الفوتوفولطائية على مدى عقود عديدة من السنين بما يكفي لسد الحاجة الكلية العالمية من الطاقة لاتبدو خارج امكانية الهندسة الحالية . فالكفاءة الاوطأ تزيد من المساحة السطحية للمصفوفة اللازمة لتوليد الطاقة المطلوبة . وان هذه الزيادة في المساحة تزيد من الكلفة وامور اخرى مثل تكاليف تحضير الموقع . وكلفة المعدات والنصب والادامة . ويشار الى هذه التكاليف وكلفة معدات تكييف القدرة بكلفة موازنة المنظومة (balance of system) وعلى قدر الامكان يجب الابقاء على كلفة موازنة المنظومة عند الحد الادنى وتشير الدراسات الى ان الحجم النموذجي للالواح المستخدمة في منظومات القدرة بحدود 1.2 × 2.5 متر (مرجع 14.8) . وهناك طرائق مختلفة لتصميم هياكل التركيب ومن اهم الاحتمالات التي تؤخذ بنظر الاعتبار في تصميم الهياكل هو مقاومة الرياح والذي له دور مهم في تحديد

جدول 14.1 النسبة المئوية للمساحة اللازمة لتوليد متطلبات الطاقة الكلية للبلدان المذكورة في سنة 1970 مع منظومات فوتوفولطائية بكفاءة 10%

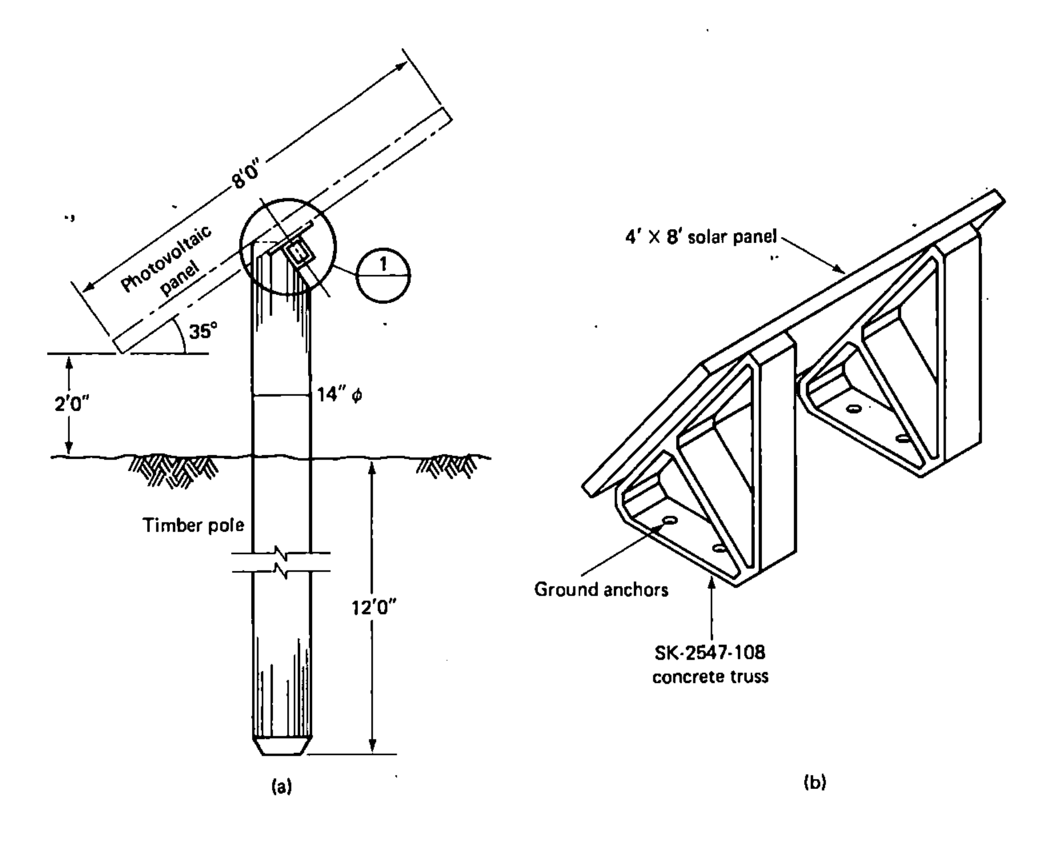
استراليا	0.03
كندا	0.2
دانيارك	4.5
ايرلندا	1
فرنسا	3.5
فلسطين المحتلة	2.5
ايطاليا	4
الاراضي المنخفضة	15
نرويج	0.5
جنوب افريقيا	0.25
اسبانيا	1
سويد	0.75
المملكة المتحدة	8
الولايات المتحدة	1.5
المانيا الغربية	8

المصدر:

Source: After D. O. Hall, "Will Photosynthesis Solve the Energy Problem?" in *Solar Power and Fuels*, ed. J. R. Bolton (New York: Academic Press, 1977), p. 36.

التكاليف والعمل على خفض ارتفاع الالواح وتوفر الحماية الذاتية من مصفوفات الالواح المجاورة لبعضها البعض واحاطة الموقع بسياج كلها تقلل تأثير الرياح وبالتالي تكاليف الهيكل. وتبين النتائج الاولية ان الاعمدة الخشبية المبينة في الشكل 14.5(a) تبدو النتائج الاولية ان الاعمدة الخشبية المبينة في الشكل تبدو جذابة بالنسبة للمنظومات الصغيرة.

اما المساند الكونكريتية الموضحة في الشكل 14.5(b) فانها مفيدة ومنافسة اقتصادياً للمنظومات الكبيرة (مرجع 14.9).



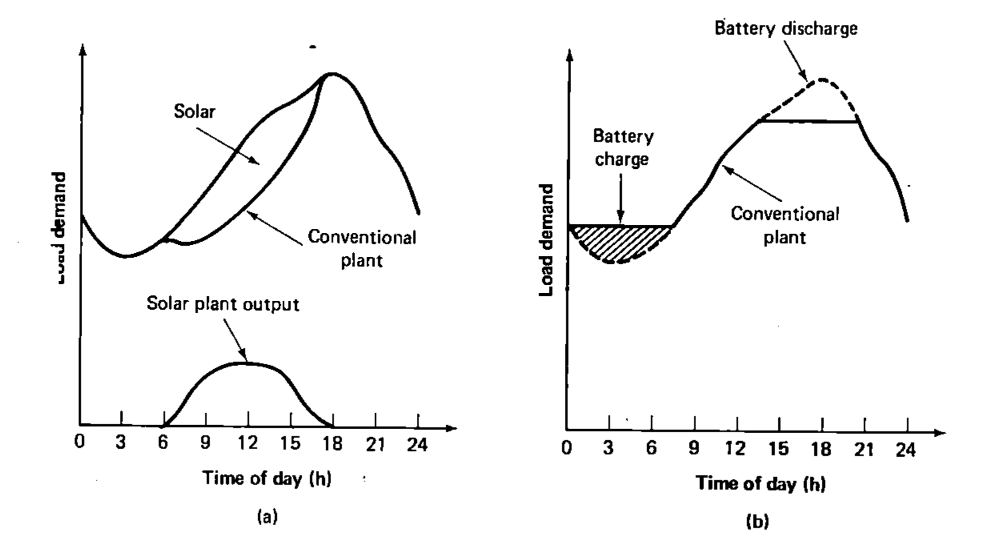
الشكل **14.5** طرائق مختلفة لتثبيت الواح الخلايا الشمسية عند التركيب في حقول كبيرة .
(a) - قضيب خشبي / نظام انبوب الالتوائي
(b)- منظومة القضبان الحديدية
(من مرجع **14.9**)

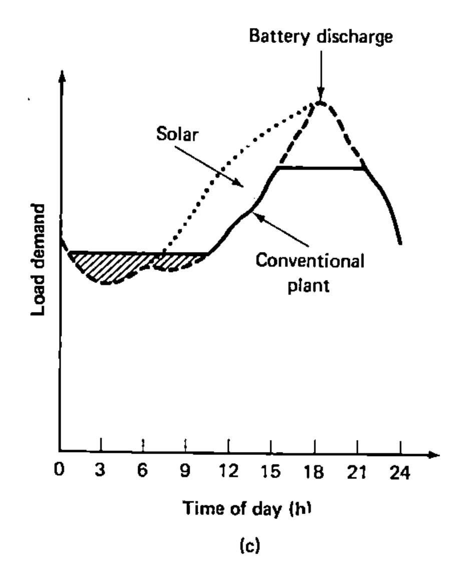
ومن غير المحتمل ان تصبح المنظومات الفوتوفولطائية مصدراً وحيداً للطاقة الكهربائية لاي شبكة ويتعذر ذلك اما لحاجتها الى طاقة خزن كبيرة جداً على المدى البعيد او التعويض عن ذلك بصفوفات كبيرة لتوليد الطاقة في الايام الغائمة . ومن الممكن التغلب على هذه المشكلة باستخدام محطات كهربائية غير شمسية ذات معدل توليد قدرة قليلة مع المنظومات الفوتوفولطائية ذات منظونة خزن لفترة قصيرة نسبياً . واكبر دور يمكن ان تلعبه المنظومات الفوتوفولطائية في الشبكات الكهربائية الكبيرة في المستقبل المنظور هو دور ازاحة الوقود (fuel displacement) وبما ان لهذا النوع من الشبكة مرونة في سد الحاجة المتغيرة مع الزمن فانه من الممكن استخدام منظومات فوتوفولطائية بدون نضائد الخزن شريطة ان تسهم المنظومة باقل من 10% من القدرة الكلية المجهزة للشبكة .

14.3.2 نمط التشغيل Operating Mode

يبين الشكل (a) 14.6 رسماً توضيحياً للحاجة من القدرة في مؤسسة كهربائية افتراضية خلال يوم نموذجي ويبين الشكل ايضا تأثير اسهام محطة فوتوفولطائية على هذه الشبكة الكهربائية . في هذه المنظومة اذ تكون ذروة الحاجة للقدرة في المساء فان تأثير المحطة الفوتوفولطائية هو تضيق عرض الذروة وكذلك زيادة عرض قعر منحنى الحاجة اليومية .

ان ربط الشبكة الكهربائية بمنظومة صغيرة لايستوجب اضافة خزن للمنظومة الفوتوفولطائية اذ ان الشبكة تستطيع امتصاص التغيرات الناتجة من المحطة الفوتوفولطائيـة تماماً كمـا تمتص التغييـرات الحاصلـة في الحمـل الكهربائي في الوقت الحاضر . وتعمل المحطة الفوتوفولطائية بوجود الخزن كمقنن للوقود (fuel saver) الـوقــت الــلازم ايضاً لتشغيـل المحطـات في توليـد القــدرة الذروية الوسطية . وعلى كل حال فان الميل الى تضييق الذروة في منحنى الحمل اليومي يحسن فاعلية الخزن في تسوية الحمل اليومي كما موضح في الشكل 14.6(b) 14.6(c) . وبهذا فان خزن الطاقة يتم بصورة رئيسة من قبل معدات الحمل في الشبكة بدلا من المحطة الفوتوفولطائية وكما مبين في الشكل 14.6(b) فان هناك التأثير المتبادل بين المحطة الفوتوفولطائية والطاقة المخزونة ، حيث ان وجود احداهما يحسن من اداء الثانية . ويظهرمن ذلك ان الشبكات،التي تعمل على خزن الطاقة في الوقت الحاضر مع محطات القدرة الكهربائية العاملة بالوقود الفحمي او النووي تكون في الوضع الامثل لتشييد المحطات الشمسية عند توفرها .وهنالك مفهوم اخر في تشغيل محطات القدرة المركزية ويتعلق بالرصيد الذي يفترض ان يعطى للمحطات الشمسية وربما يقال بانه لايوجد اي رصيد للمحطة الفوتوفولطائية لان نتاج هذه المحطة يكون قليلا خاصة في الايام الغائمة ويجب توفير الاسناد للتغطية في هذه الايام . والحالة العملية اعقد بكثير من ذلك . فمن الممكن توقف المعدات التقليدية عن العمل في وقت غير متوقع . والطريقة المستخدمة لحساب سعة المنظومة هي تحديد مستوى الوثوقية في تلبية الحاجة المطلوبة من الطاقة وحساب اقصى حمل بالامكان تلبية هذا المستوى من الوثوقية ويبين الشكل 14.7 النتيجة الحسابية لشبكة كهربائية خماسية بدون منظومة فوتوفولطائية وشبكة اخرى تتضمن منظومة فوتوفولطائية ذات قدرة ذروية 500 ميكا واط (MWp) وهذه المنظومة الفوتوفولطائية مع نظائد خزن بسعة 2000 ميكا واط – ساعة (مرجع 14.10) وبشكل عام بالنسبة لهذه الشبكة سيكون الرصيد السنوي لمنظومة الفوتوفولطائية ثلث السعة الذروية . وعند ربط نضائد الخزن يزداد هذا الرصيد الى 580 ميكاواط . وفي هذا المثال تظهر الحاجة القصوى للقدرة عند الساعة



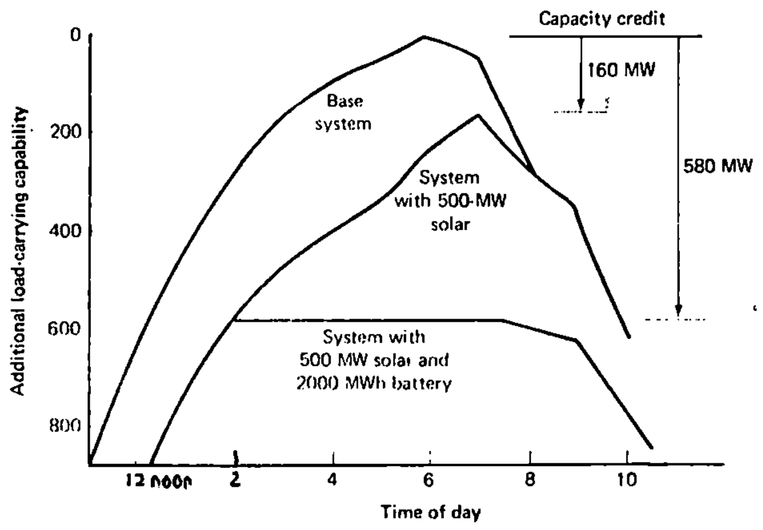


الشكل 14.6 (a) حاجة الطاقة اليومية النموذجية مبيناً اسهام قليل من محطة فوتوفولتائية (b) استخدام الرصيد المخزون من الطاقة لتحديد عرض الذروة الموجودة في منحنى حاجة الطاقة اليومية لنظام تشغيل بدون محطة فوتوفولطائية (c) حالة تشبه حالة (b) ولكن مع اسهام المحطة الفوتولطائية في العمل .

السادسة مساءً في الصيف وهذا ينطبق على العديد من الشبكات في امريكا واذا وقع حمل الذروة قريباً من منتصف النهار يزداد رصيد السعة للمنظومة الفوتوفولطائية بالنسبة لسعة الذروة للشبكة . ومن جهة اخرى اذا وقع حمل الذروة خارج ساعات سطوع الشمس (مثلا ليالي الشتاء ، فان رصيد السعة يكون اقل بكثير من ذلك .

14.3.3 محطات الطاقة الفضائية Satellite Solar Power Stations

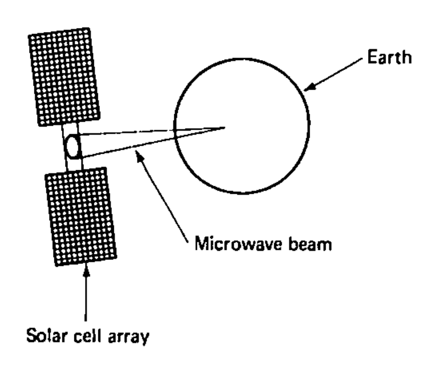
لايوجد اي كتاب في موضوع ينتهي دون ذكر مفاهيم خيالية حول استخدام مصفوفات الخلايا الشمسية في الفضاء لاقتناص ضوء الشمس وارسال الطاقة الى الارض على شكل حزم من الامواج الدقيقة كما موضح في الشكل 14.8 .
حيث توضع المحطة في مدار ثابت متزامن (geosynchronous) حول الارض وعلى ارتفاع كبير مقارنة بنصف قطر الارض . وهذا يضمن عدم تظليل المحطة بظل الارض الا في حدود ساعة واحدة عند منتصف الليل في الاسابيع التي تكون فيها المحطة مقابلة لخطي الاعتدال الربيعي والخريفي . والمرجع 14.11 يناقش هذا الموضوع بشيء من التفضيل .



الشكل 14.7 نتيجة الحاسب الالكتروني لرصيد السعة يمكن ان تنسب الى محطة فوتولطائية وفي هذا المثال يكون رصيد هذه السعة بحدود ثلث المعدل الذروي للمنظومة . الخزن في النضيدة يساعد على زيادة رصيد السعة (من مرجع 14.10) .

ومن اهم فوائد هذه المنظومة هو توفر ضوء الشمس بصورة مستمرة عدا الفترات القليلة المذكورة اعلاه حيث لاتحتاج المنظومة الى نضائد الخزن ويمكن استخدامها على اساس مجهز رئيسي للطاقة ومن الفوائد الاخرى الشدة العالية للضوء في الفضاء ، اذمن السهل ان يكون سطح المصفوفة عمودياً تقريباً على مسار الضوء . واذا اخذنا مصفوفة بسعة معينة فانها يمكن ان تولد قدرة خمس الى ثمان مرات اكبرمما تنتج في موقع مشمس على سطح الارض . ويقل هذا العامل اثناء العمل نتيجة الخسارة ذات العلاقة بنقل الطاقة المتجمعة الى سطح الارض .

ومن مساوىء هذه المنظومة هو صعوبة تصليح العطب وتكاليف موازنة المنظومة عالية . كما ان هناك مشاكل التوسيع الفضائي لتراكيب هذه المصفوفات وادامتها . وتحتاج مثل هذه المنظومة انشاء خزانات كبيرة نوعاً ما على سطح الارض لاستلام الطاقة المنبعثة من المحطات الفضائية . كما ان التأثيرات البيئية الناتجة عن حزمة الموجات الدقيقة فالشدة والحجم المطلوبين يحتجان الى دراسة دقيقة .



الشكل 14.8 محطة فوتوفولطائية فضائية تجمع الطاقة وتبعثها الى سطح الارض على شكل حزمة امواج دقيقة .

14.4 الخلاصة SUMMARY

في هذا الفصل الاخير من هذا الكتاب تم عرض مقترحين لاستخدام الخلايا الشمسية في تطبيقات طويلة الامد . وان كلفة الخلايا المستخدمة في هذين التطبيقين بدون شك تقع ضمن دائرة التقنية المتيسرة في الوقت الحاضر .

ومن الممكن استخدام منظومة فوتوفولطائية سكنية في اماكن مجهزة بشبكة كهربائية بألواح شمسية اغلى مما يستخدم في المحطات المركزية اذ ان حسابات سكانها لها اعتبارات تختلف عن الثانية . ومن الناحية التقنية ، بدأت مصانع عديدة بانتاج خلايا شمسية بسعر مناسب لهذه التطبيقات. ومن المعوقات الرئيسة في طريق استخدام الخلايا الشمسية في الوحدات السكنية هي ليست تقنية وانما نظامية ترتبط بقوانين البناء ومواصفاتها وقوانين الربط بالشبكة الرئيسة وسبل تمويل المصفوفات الشمسية ... الخ •

ومن غير المحتمل ان تستخدم المنظومات الفوتوفولطائية بشكل محطة مركزية مستقلة لانها تحتاج الى خزان ضخم جداً للطاقة . الا ان مشاركة منظومة فوتوفولطائية بجزء من القدرة في الشبكة الكهربائية يجعل خزن الطاقة غير مهم . لذا فان وجود الشبكة والمحطة الفوتوفولطائية تكمل احداهما الاخرى ووجود اي منهما يجعل وجود الثاني ممكناً . وان وجود منظومة تجهيز غير شمسية يساند المنظومة الفوتوفولطائية مع قليل من الخزن فقد يكون الحل في ايجاد محطات فوتوفولطائية تجهز القسم الاعظم من القدرة الى الشبكة . وظهرت حديثاً تقنية الاغشية الرقيقة لانتاج خلايا شمسية بكلفة رخيصة للمساحة اللازمة لمحطات القدرة المركزية والمطلوب هو رفع القدرة الخارجة لوحدة المساحة بالنسبة لهذه الخلايا ولقد تم توفير الخلايا الشمسية من السليكون العشوائي تجارياً منذ عام 1980 والتي يكاد ان يصل ادائها داخل المختبر اداء خلايا مصنوعة من نوعية جيدة من السليكون البلوري والتحدي الآن هو الحصول على هذا الاداء خارج المختبر وفي المحطات .

REFERENCES المراجع

[14.1] W. FEDUSKA et al., *Energy Storage for Photovoltaic Conversion; Residential Systems—Final Report*, Vol. 3, prepared for US National Science Foundation, Contract No. NSF C-7522180, September 1977.

[14.2] A. R. MILLNER AND T. DINWOODIE, "System Design, Test Results, and Economic Analysis of a Flywheel Energy Storage and Conversion System for Photovoltaic Applications," *Conference Record, 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego*, 1980, pp. 1018–1024.

[14.3] P. R. RITTELMANN, "Residential Photovoltaic Module and Array Requirements Study," in *Proceedings of the U.S. DOE Semi-Annual Program Review of Photovoltaics Technology Development, Applications and Commercialization*, U.S. Department of Energy, Report No. CONF-791159 (1979), pp. 201–223.

[14.4] N. F. SHEPARD, JR. AND L. E. SANCHEZ, "Development of a Shingle-Type Solar Cell Module," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D.C.*, 1978, pp. 160–164.

[14.5] V. CHOBOTOV AND B. SIEGAL, "Analysis of Photovoltaic Total Energy System Concepts for Single-Family Residential Applications," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D.C.*, 1978, pp. 1179–1184.

[14.6] M. D. POPE, "Residential Systems Activities," in *Proceedings of the U.S. DOE Semi-Annual Program Review of Photovoltaics Technology Development, Applications and Commercialization*, U.S. Department of Energy, Report No. CONF-791159 (1979), pp. 346–352.

[14.7] E. C. KERN, JR. "Residential Experiments," in *Proceedings of Photovoltaics Advanced R and D Annual Review Meeting*, Solar Energy Research Institute Report No. SERI/TP-311-428 (1979), pp. 17–36.

[14.8] P. TSOU AND W. STOLTE, "Effects of Design of Flat-Plate Solar Photovoltaic Arrays for Terrestrial Central Station Power Applications," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D.C.*, 1978, pp. 1196–1201.

[14.9] H. N. POST, "Lost Cost Structures for Photovoltaic Arrays," *Conference Record, 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego*, 1980, pp. 1133–1138.

[14.10] C. R. CHOWANIEC et al., "Energy Storage Operation of Combined Photovoltaic/Battery Plants in Utility Networks," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D.C.*, 1978, pp. 1185–1189.

[14.11] D. L. PULFREY, *Photovoltaic Power Generation* (New York: Van Nostrand Reinhold, 1978), pp. 56–62.

ملحق A الثوابت الفيزيائية

q شحنة الالكترون = 1.602×10^{-19} كولوم

m_0 كتلة السكون للالكترون = 9.108×10^{-28} غرام

= 9.108×10^{-31} كغم

c سرعة الضوء في الفراغ = 2.998×10^{8} m/s متر / ثانية

ϵ_0 ثابت السماحية للفراغ = 8.854×10^{-14} فاراد / سم

= 8.854×10^{-12} فاراد / م

h ثابت بلانك = 6.625×10^{-27} ارك.ثانية

= 6.625×10^{-34} جول.ثانية

k ثابت بولتزمان = 1.380×10^{-16} ارك كلفن

$\frac{kT}{q}$ الفولتية الحرارية = 0.02586 فولت (عند درجة 300 كلفن)

λ_0 طول الموجي في الفراغ ذات العلاقة بالفوتون ذو طاقة 1 الكترون فولت = 1.239 مايكرون

Prefixes البوادىء

milli (m) = 10^{-3}	kilo (k) = 10^{3}
micro (μ) = 10^{-6}	mega (M) = 10^{6}
nano (n) = 10^{-9}	giga (G) = 10^{9}
pico (p) = 10^{-12}	

ملحق B الخصائص المنتقاة للسليكون (عند 300 كلفن)

E_g الفجوة المحظورة

N_C الكثافة الفعالة للمراتب في حزمة التوصيل = 3×10^{19} سم$^{-٣}$

= 3×10^{25} م$^{-٣}$

N_V الكثافة الفعالة للمراتب في حزمة التكافؤ

= 1×10^{19} سم$^{-٣}$ = 1×10^{25} م$^{-٣}$

n_i التركيز الذاتي = 1×10^{-19} م$^{-٣}$

ϵ_r السماحية النسبية = 11.7

$\hat{n}$ معامل الانكسار = 3.5 (عند طول الموجي 1.1 مايكرون)

μ_e تحركية الالكترون ≤ 1350 سم^2/ فولت . ثانية ≤ 0.135 م^2/ فولت ثانية (انظر المعادلة 2.36)

μ_h تحركية الفجوة ≤ 480 سم^2/ فولت . ثانية ≤ 0.048 م^2/ فولت . ثانية [انظر المعادلة (2.36)] .

D_e ثابت انتشار الالكترون = $0.02586\ \mu_e$

D_h ثابت انتشار الفجوة = $0.02586\ \mu_h$

ρ المقاومية الكهربائية [انظر المعادلة (2.35)]

= كثافة = 2.33 غرام/ سم^3 = 2330 كغم/ م^3 .

ملحق C قائمة الرموز المستخدمة ،

ξ شدة المجال الكهربائي

α معامل الامتصاص

ϵ ثابت العزل

ϕ دالة الشغل

ϕ_B ارتفاع الجهد

λ طول الموجي

μ التحركية

η الكفاءة

ρ كثافة شحنة الفضاء ، المقاومية ، المقاومية الصفيحية ، مقاومة الوصل النوعي .

σ التوصيلية

τ الديمومة

ψ_0 الجهد المنشأ

χ فناء الالكترون

A مساحة المقطع العرضي

c سرعة الضوء في الفراغ

D ثابت الانتشار

E الطاقة

E_c, E_v طاقات حافات حزمة التوصيل والتكافؤ

f_c احتمالية التجميع للحاملات المتولدة بالضوء

E_F طاقة فرمي

FF عامل الملء للخلية الشمسية

G معدل التوليد لزوج الكترون ـ فجوة .

h ثابت بلانك

I تيار ، الشدة

I_0 تيار الاشباع للثنائي

I_{sc} تيار الدائرة القصيرة

J كثافة التيار

J_e, J_h كثافة تيار الالكترون وكثافة تيار الفجوة

k ثابت بولتزمان

$\hat{k}$ معامل الخمود

L_e, L_h طول الانتشار للالكترون ، وطول الانتشار للفجوة

m_0 الكتلة الساكنة للالكترون

m_e^*, m_h^* الكتلة الفعّالة للالكترون والكتلة الفعّالة للفجوة

n تركيز الالكترونات

n_{n0}, n_{p0} تركيز الالكترونات عند التوازن الحراري في شبه الموصل نوع -n وتركيز الالكترونات عند التوازن الحراري في شبه الموصل نوع -p

$\hat{n}_c$ معامل الانكسار

$\hat{n}$ الجزء الحقيقي لمعامل الانكسار

n_i التركيز الذاتي

N_C, N_V الكثافات الفعالة للمراتب في حزمة التوصيل وحزمة التكافؤ .

N_A, N_D كثافة القابلات والمواهبات

p كثافة الفجوات ، زخم البلورة ، الفقد الجزئي للقدرة

p_{n0}, p_{p0} تركيز الفجوات عند التوازن الحراري في شبه الموصل نوع -p وتركيز لألكترونات عند التوازن الحراري في شبه الموصل نوع -n

q شحنة الالكترون

R المقاومة

t الزمن

T درجة الحرارة

U صافي معدل اعادة الاتحاد

V فولتية ، فرق الجهد

V_{oc} فولتية الدائرة المفتوحة

BIBLIOGRAPHY بيبلوغرافي

BACKUS, C. E., ed., *Solar Cells*. New York: IEEE Press, 1976. A collection of technical papers significant in the development of solar cells.

HOVEL, H. J., *Solar Cells*, Vol. 11, Semiconductor and Semimetal Series, ed. R. W. Richardson and A. C. Beer. New York: Academic Press, 1975. A review of the theory and performance of solar cells.

JOHNSTON, W. D., *Solar Voltaic Cells*. New York: Marcel Dekker, 1980. Review of the current status of photovoltaic development.

MERRIGAN, J. A., *Sunlight to Electricity: Prospects for Solar Energy Conversion by Photovoltaics*. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1975. Investigates the technical practicality and economic viability of solar cells.

NEVILLE, R. C., *Solar Energy Conversion: The Solar Cell*. Amsterdam: Elsevier, 1978. Emphasis on the theoretical effects of relevant parameters on solar cell performance.

PULFREY, D. L., *Photovoltaic Power Generation*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1978. Treatment of the technical, economic, and institutional issues relevant to the large-scale terrestrial application of solar cells.

RAUSCHENBACH, H. S., *Solar Cell Array Design Handbook*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1980. Source of practical data related to solar cell module and array design for terrestrial and space systems.

SITTIG, M., *Solar Cells for Photovoltaic Generation of Electricity*. Park Ridge, N.J.: Noyes Data Corporation, 1979. A guide to U.S. patent literature in the photovoltaic field between 1970 and 1979.

معجم المصطلحات العلمية الواردة في الكتاب

abrasion	التآكل
adherence	التصاق
antireflection coating	طلاء غير العاكس
array	مصفوفة
atmospheric turbidity	عكرة الجو
atmospheric monitoring	المراقبة الجوية
Auger recombination	اعادة اتحاد اوشي
balance of system	كلفة الموازنة للمنظومة
back surface field	مجال السطحى الخلفي
black body cell	خلية الجسم الاسود
black body radiation	اشعاع الجسم الاسود
block	قالب
boundary condition	الشرط الحصري
busbar	الموصل الرئيس
block	قالب
brittle	هش
calibrated cell	الخلية القياسية
capture cross section	المقطع العرضي لِلقنص
dlection Probability	احتمالية التجميع
casting	صب القالب
contact	التوصيل ، القطب
convection	الحمل الحراري
converter	محولة
contact resistance	مقاوة الوصل
dangling bonds	الاواصر السائبة
declination angle	زاوية الميلان
defect	العيوب
deplesion region	منطقة الاستنزاف
diode	ثنائي
diffusion length	طول الانتشار
diffuse radiation	الاشعاع المنتشر

diffusion potential	الجهد الانتشاري
direct band gop	الفجوة المباشرة
divergence operator	المؤثر التفريقي
drift	الانجراف
electrom affinity	فناء الالكتروني
electrode	القطب الكهربائي
electromotive force	قوة كهربائية محركة
emission coefficient	معامل الانبعاث
encapsulation	تغليف
epitaxial layer	طبقة بلورية فوقية
equinoxe	خط الاعتدال
etchant	مزيل
fatigue	كلال في المعدن
foil	صفيحة
field data	البيانات الحلقية
grain boundary	حدود الحبيبية
hetrojunction	مفرق متباين
homojunction	مفرق متجانس
impact ionization effect	تأثير التأين التصادمي
indirect band gap	الفجو غير المباشرة
ingot	صبة أو القالب
integrated circuit	الدائرة المتكاملة
interface	السطح البيني
interference coating	طلاء التداخل
junction	مفرق
lead-acide battry	نضيدة رصاص ـ حامض
lifetime	الديمومة ، زمن العمر
luminescent concentrator	المركز الاضائي
majority carrier	حاملات الاغلبية
mechanism	الآلية
microvoide	فجوة صغرة جداً
metalization	تعدين

mine	منجم
mismach loss	خسارة عدم الموائمة
minority carrier	حاملات الاقلية
mobility	التحركية
module	اللوح الشمسي
muximum power point	نقطة القدرة القصوى
normalized voltage	الفولتية المعيارية
passivation	كبح الفعالية
peak power	القدرة الذروية
photoelectrolysis	التحليل الكهربائي الضوئي
photolithography	النحت الضوئي
poisson's equation	معادلات بوازن
power conditioning system	منظومة تكييف القدرة
porcelainized steel	الفولاذ الخزفي
pumpes hydro storage	الضخ الكهرومائي
quasi-nutral region	منطقة شبه متعادلة
radiator	المشعاع
radiative recombination	اعادة الاتحاد الاشعاعي
redox	التأكسد والاختزال
relaxation	الاسترخاء
regulator	المنظم
recombination center	مركز اعادة الاتحاد
refine	تكرير
ribbon	شريط
seed crystal	بذرة التبلور
sheet resistivity	المقاومة الصفيحية
Schottky barrier	حاجز شوتكي
single crystal	بلورة احادية
sintered	تتلبد
solar radiation	الاشعاع الشمسي
solar grade silicon	خام السليكون الشمس
solar insolation	الاشعاع الشمسي الساقط
summer solistice	الانقلاب الصيفي

spectral response	الاستجابة الطيفية
spectroscopy	المطيافية
spike	نتوء ، بروز
stand alone system	المنظومة المستقلة
stratification	تنضيد
string	سلسة
standard technology	التقنية القياسية
superconducting magnet	مغناطيس ذو توصيلية مفرطة
surface recombination	اعادة اتحاد السطحي
thermoelectric	تحويل كهروحراري
thermo photovoltaic	الفوتوفولطائي الحراري
telecommunication	الاتصال عن البعد
top- contact	القطب العلوي
trap	القنص أو الشرك
trough concentrator	المركز الحوضي
Vaccum evapuration	التبخير في الفراغ
wave guide	دليل الموجة
wafer	رقاقة ، شريحة

رقم الايداع في المكتبة الوطنية ببغداد ٢٠٧٨ لسنة ١٩٨٩


مطبعة التعليم العالي في الموصل

SOLAR CELLS

MARTIN A.GREEN

Translated by :
Y. M. HASSAN
1989

الدار الدولية للنشر والتوزيع
8 شارع إبراهيم العرابى – النزهة الجديدة – القاهرة
ص.ب : 5599 هليوبوليس غرب – القاهرة
ت : 2972344 / 5957655 فاكس : 2957655 (00202)

